




Статья

Различия в зависимости климата и роста Сосна обыкновенная: пример Польши и Венгрии

Дэвид Миси ¹, Радослав Пухалка ^{2,*} , Шарлотта Пирсон ³, Иэн Робертсон ⁴ 
и Марцин Копровски ² 

¹ Кафедра геологии и палеонтологии, Сегедский университет, H-6722 Сегед, Венгрия;
misid@geo.u-szeged.hu

² Кафедра экологии и биогеографии, факультет биологии и охраны окружающей среды, Николаус
Университет Коперника, Львовска1, 87-100 Торунь, Польша; koreg@umk.pl

³ Лаборатория исследований годичных колец, Университет Аризоны, Тусон, Аризона 85721, США;
c.pearson@lrr.arizona.edu

⁴ Географический факультет, Колледж естественных наук, Университет Суонси, Суонси SA2 8PP, Великобритания;
i.robertson@swansea.ac.uk

* Переписка: puchalka@umk.pl; Тел.: +48-56-611-47-90

Получено: 26 декабря 2018 г.; Принято: 6 марта 2019 г.; Опубликовано: 9 марта 2019 г.



Аннотация: Сосна обыкновенная — это легко приспосабливаемый и распространенный европейский вид деревьев, произрастающий в естественных условиях по всей Европе и был посажен в самых разных условиях. Предыдущие исследования показали, что климатические переменные влияют на характер роста годичных колец у этого вида, но также возможно, что определенные аспекты среды роста смягчают эту реакцию. Для того, чтобы понять потенциальное влияние изменения климата на этот важный вид, в этом исследовании сравнивался рост реакция двух популяций сосны обыкновенной. Деревья из схожих биоклиматических регионов Венгрии и Польши проводилось с использованием гипотезы о том, что различия в связи между климатом и рост будут отражаться степенью изменения ширины годичных колец. Мы также хотели знать как изменение климатических условий повлияло на временную стабильность сигнала климат-рост в наиболее важные периоды роста деревьев. Явные сходства в воздействии температуры и Между двумя участками были обнаружены колебания в ширине годичных колец, но также были обнаружены некоторые интересные различия. В конце зимы и начале весны обе популяции реагировали на потепление с уменьшающейся связью с температурой. Летние осадки были показаны доминирующий фактор в контроле ширины кольца. Тенденция к снижению значений летних осадков как на венгерском, так и на польском сайтах это привело к ослаблению переписки на венгерском языке деревья, в то время как польские деревья показали значительное увеличение корреляции с летними осадками. Результаты показали, что изменения климата по-разному повлияли на изучаемые деревья, что последствия для будущего баланса роста сосны обыкновенной в Европе.

Ключевые слова: дендроклиматология; дендрэкология; *Pinus sylvestris* L.; годичные кольца; изменение климата

1. Введение

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) — одна из самых распространенных пород деревьев в центральной и восточной части Европа, с самым широким естественным ареалом среди всех сосен. Тот факт, что она может хорошо расти на питательных Плохие места привели к посадке растений за пределами их естественного ареала, в то время как более богатые лесные участки, более подходящие для лиственные породы, были адаптированы для сельского хозяйства. В результате этого процесса из всех сосновых В Венгрии сосна обыкновенная представляет собой самую большую группу деревьев, и хотя она не является местной, она играет важную роль существенная роль в составе венгерских лесов (NFCSO Лесное управление Инвентаризация лесов 2010–2014 гг. (<http://portal.nebih.gov.hu/documents/531011/531862/2001101001000.pdf/c9a01ba7->

Сосна обыкновенная хорошо известна своей способностью расти в широком диапазоне относительных экстремальных температур. Сосна обыкновенная хорошо известна своей способностью расти в широком диапазоне относительно экстремальных условий. Однако исследование происхождения показало, что в пределах распространения *P. sylvestris*, условия. Однако исследование происхождения показало, что в пределах распространения *P. sylvestris* различные субпопуляции развивают адаптации к определенным местным климатическим условиям. Например, различные субпопуляции вырабатывают адаптации к конкретным местным климатическим условиям. Например, морозостойчивые подвиды из Лапландии не могли быть заменены соснами из южной Испании. Устойчивые подвиды из Лапландии не удалось заменить соснами с юга Испании. Интересно, что там, где *P. sylvestris* растет в оптимальных условиях, деревья демонстрируют высокую пластичность. Интересно, что там, где *P. sylvestris* растет в оптимальных условиях, деревья демонстрируют высокую пластичность и адаптивность [1]. Из дендроклиматических исследований сосны и других пород мы можем наблюдать и адаптивность [1]. Из дендроклиматических исследований сосны и других видов мы можем наблюдать некоторые общие эффекты температуры и осадков на рост годовичных колец в разных регионах. Некоторые общие эффекты температуры и осадков на рост годовичных колец деревьев в разных регионах. В Польше широкие кольца образуются особенно тогда, когда наблюдаются более высокие температуры в феврале и в Польше широкие кольца образуются особенно тогда, когда наблюдаются более высокие температуры в феврале и марте и когда в вегетационный период выпадают осадки [4]. В Венгрии осадки Март и когда есть осадки в течение вегетационного сезона [4]. В Венгрии осадки с июня по июль и температуры с февраля по март являются доминирующими регуляторами с летним с июня по июль и температуры с февраля по март являются доминирующими регуляторами, а летние температуры играют второстепенную роль [5–8]. На северо-востоке Германии образуются широкие кольца температуры играют второстепенную роль [5–8]. На северо-востоке Германии широкие кольца формируются во время влажного/теплого февраля и влажного/холодного июня [9]. В Чехии февраль и март в течение влажного/теплого февраля и влажного/холодного июня [9]. В Чешской Республике температуры февраля и марта и летние осадки являются критическими факторами, благоприятствующими росту [10], а в Литве температуры и летние осадки являются критическими факторами, благоприятствующими росту [10], а в Литве низкий уровень осадков в мае и июне является ключевым ограничивающим фактором [11]. Некоторые из этих исследований также подтверждают Низкий уровень осадков в мае и июне является ключевым ограничивающим фактором [11]. Некоторые из этих исследований также подтверждают, что такие климатические переменные действительно являются доминирующими факторами роста, даже там, где растут деревья, что такие климатические переменные действительно являются доминирующими факторами роста, даже там, где деревья растут на различных типах почв с различными режимами питания [11,12]. на различных типах почв с различными режимами питания [11,12].

В текущем исследовании мы предположили, что, несмотря на различную историю распространения, В текущем исследовании мы предположили, что, несмотря на различную историю распространения, не будет никакой разницы между долгосрочной реакцией популяции деревьев на температуру и осадки. не будет никакой разницы между долгосрочной реакцией на температуру и осадки деревьев для этого вида, поскольку деревья из одной и той же биоклиматической зоны. Как и популяции в Венгрии, популяции для этого вида, потому что деревья из той же биоклиматической зоны. Поскольку популяции, растущие за пределами их естественного ареала, видели годы культивации и к настоящему времени хорошо адаптированы в Венгрии, произрастающие за пределами своего естественного ареала, подвергались многолетнему культивированию и к настоящему времени хорошо приспособились к местным условиям окружающей среды, реакция роста на климат не будет существенно отличаться от адаптированы к местным условиям окружающей среды, реакция роста на климат не будет существенно отличаться

Сосна обыкновенная растет в Польше. Межвидовая дифференциация в адаптации к факторам окружающей среды из сосны обыкновенной, растущей в Польше. Межвидовая дифференциация в адаптации к окружающей среде

важный вопрос в прогнозировании реакции сосны обыкновенной на прогнозируемые изменения условий окружающей среды [13].

Основной целью нашей работы было проанализировать две популяции и оценить, какие климатические параметры больше всего влияют на рост годовых колец сосны обыкновенной в этих распределениях. Кроме того, мы исследовали временную стабильность сигнала климат-рост и определили его зависимость от изменений температуры и тенденций осадков, чтобы информировать о будущих прогнозах, связанных с изменением климата.

2. Материалы и методы

2.1 Места исследований и климатические данные

Венгерский участок (Fenyőfő: 47° 21 с.ш., 17° 45 в.д.) расположен в северной части Западной Венгрии (рис. 1), на северных склонах гор Баконь. Участок хорошо известен распространением сосны обыкновенной, а лес является старейшим сосновым насаждением в Венгрии. Субстрат представляет собой вторично эволюционировавший дюнный песок со слабогумусной песчаной почвой, покрывающей известковую песчаную коренную породу [14]. Лес смешан с дубом (*Quercus cerris* L., *Q. robur*, *Q. petraea*), березой повислой (*Betula pendula* Roth) и ясенем (*Fraxinus ornus* L.), но в пологе преобладает популяция сосны, которая сильно различается по возрасту. Хотя преобладают молодые особи, нетрудно найти деревья возрастом более 120 лет со стволами более 2,4 м в диаметре. Климат региона умеренно теплый (код Кеппен: Cfbx) и сильно зависит от гор Баконь [15]. Среднегодовая температура (1965–2010) в этом районе составляет 10,3 °C, а общее среднее многолетнее количество осадков составляет 650 мм. Самый теплый месяц — июль (20,6 °C), а самый холодный — январь (−1,1 °C). Большая часть осадков выпадает в период с конца весны до начала лета (май–июль) с максимумом в июле (75 мм).

Польское место находится в северо-восточной части Польши, в Мазурском поозерье (53° 46 с.ш., 19° 58 в.д.). Место также хорошо известно, и деревья были специально названы сосной Таборской, чтобы отличать их от других сосен из-за качества древесины. В частности, их пригодность для использования в качестве корабельных мачт привела к хорошо документированной покупке голландской королевой в 16 веке нашей эры. Подстилающий субстрат в этом регионе представляет собой ледниковую глину, покрытую богатыми гуминовыми почвами, что обеспечивает богатую или умеренно богатую среду роста для сосен, чтобы расти вместе с *Fagus sylvatica* L. [16]. Климатические данные для региона показывают, что долгосрочная (1951–1965) среднегодовая температура составляет 7 °C, а общее долгосрочное среднегодовое количество осадков составляет 554 мм. Самый теплый месяц — июль (22,5 °C), а самый холодный — февраль (−6,9 °C). Большая часть осадков выпадает в период с конца весны до начала лета (июль–август) с максимумом в июле (91 мм) [17]. Для обоих участков мы использовали сеточные ежемесячные и сезонные данные о температуре и осадках CRU TS 3.23 0,5 × 0,5 [18], которые были извлечены для областей, охватываемых координатами 47°–47,5° с.ш. и 17,5°–18° в.д. и 53°–53,5° с.ш. и 19,5°–20° в.д. с использованием KNMI (Королевский метеорологический институт Нидерландов) Исследователь климата (<http://climexp.knmi.nl/>).

Для определения различий между исследуемым участком на западе Венгрии и естественным ареалом на севере Польши мы использовали значения климатических индексов из набора данных BIOCLIM 1.4 (<http://worldclim.org>) [19]. Эти переменные считаются ограничивающими факторами пространственного распределения сосны обыкновенной и обычно используются для моделирования ниши или анализа толерантности видов к различным климатическим условиям (например, [20–22]). Климатические переменные были извлечены из карт с координатной сеткой с разрешением 2,5 угловых минут с помощью программного обеспечения DIVA-GIS 7.5 [23,24]. Мы использовали 273 местонахождения *P. sylvestris* ssp. *sylvestris* из естественного ареала, взятые из *Conifers of the World* в качестве контрольных точек для климатических условий, а также онлайн-базу данных Resources for Conifer Research (<http://herbaria.plants.ox.ac.uk/bol>). Выбранные годовые и сезонные индексы BIOCLIM были объединены в пары и представлены на графиках (рисунок S1). Кроме того, были сравнены значения BIOCLIM для обоих участков исследования (таблица 1).

Таблица 1. Выбранные для сравнения биоклиматические переменные участков исследования [19].

Биоклиматическая переменная	Польша	Венгрия
Изотермичность $(2/7) \times 100$	24	30
Сезонность температуры (стандартное отклонение $\times 100$)	816,9	759,6
Максимальная температура самого теплого месяца	23 °C	25,8 °C
Минимальная температура самого холодного месяца	7,6 °C	4,8 °C
Годовой диапазон температур (5–6)	30,6 °C	30,6 °C
Средняя температура самого влажного квартала	17,1 °C	19 °C
Средняя температура самого сухого квартала	1,8 °C	0,9 °C
Средняя температура самого теплого квартала	17,1 °C	19 °C
Средняя температура самого холодного квартала	3,9 °C	0,6 °C
Осадки самого дождливого месяца	81 мм	71 мм
Осадки самого сухого месяца	31 мм	32 мм
Сезонность осадков (коэффициент вариации)	30	27
Осадки самого влажного квартала	235 мм 189 мм	
Осадки самого сухого квартала	103 мм 103 мм	
Осадки самого теплого квартала	235 мм 189 мм	
Осадки самого холодного квартала	120 мм 117 мм	

2.2. Построение хронологии

Для отбора проб были отобраны старые, доминирующие и здоровые деревья, из каждого дерева было извлечено по два керна. на высоте груди с использованием стандартных методов. Все образцы были высушены на воздухе, затем отшлифованы и отполированы для улучшения структуры годичных колец дерева. Измерительная станция LINTAB (<http://www.rinntech.de>) был использован для измерения ширины кольца с точностью 0,01 мм [26] для венгерских образцов. Польские Сначала ядра были отсканированы с разрешением 1200 точек на дюйм с использованием стандартного сканера (Epson Perfection V700 Фото) затем ширина годичных колец была измерена с точностью до 0,01 мм с помощью программного обеспечения Coorecorder и соответствующая программа CDendro (<http://www.cybis.se>). Экранное перекрестное датирование отдельных серий была выполнена с использованием программ TSAPX и TSAP-Win [26]; интеркорреляция серий, пропущенное кольцо идентификация и обнаружение возможных ошибок датирования были проверены с помощью программы COFESNA 6.06P [27].

Неклиматические тенденции, сохраняющиеся в моделях роста годичных колец деревьев, связанные с возрастом и размером дерева и влияние динамики стенда были устранены путем подгонки кубического сглаживающего сплайна с 50% Частотная характеристика на 67% длины индивидуального ряда [28]. Автокорреляция была удалена из каждого индивидуальный индекс, затем все остаточные ряды (полученные из авторегрессионного моделирования детрендированных серии измерений) были усреднены для хронологии участка с использованием двухвзвешенного надежного среднего [29]. Для проверки стабильности сигнала, связанного с климатом, сохраненного в индексном ряду, выраженный Расчет сигнала населения (EPS) был применен с 25-летним окном, отстающим на 1 год, с использованием 0,85 в качестве широко принятый порог [30]. Кроме того, средняя межсерийная корреляция (R_{bar}) была рассчитана с то же окно и задержка, что и значения EPS. Стандартизация и процедура расчета индекса были выполнено с использованием ARSTAN 4.1b_XP [31].

Для исследования взаимосвязей между ростом климата мы применили корреляцию функции отклика из пакета R TREECLIM [32] с использованием процедуры начальной загрузки в качестве одного из решений для получения более надежного Оценки параметров. Независимая переменная, сумма осадков и среднемесячная температура с мая предыдущего года по сентябрь текущего года. Временной ряд для каждого параметра В качестве зависимой переменной использовалась. Для оценки связи между климатическими данными и Индекс годичных колец, корреляция Пирсона была рассчитана с мая предыдущего года по сентябрь текущий год формирования годичных колец. Временная стабильность соотношения климат-рост была исследовали путем вычисления 30-летней скользящей корреляции температуры, осадков и индекс годичных колец для выбранных периодов.

3. Результаты

3.1. Древесно-кольцевая хронология

3.1. Древесно-хронологические участки были построены в каждом месте. На венгерском участке 96 образцов из 48 деревьев сформировали хронологию с временным интервалом в 100 лет (1914–2013), а на польском участке 25 образцов хронологии участков были построены в каждом месте. На венгерском участке 96 образцов из 15 деревьев, охватывающих период 1855–2015 гг. 48 деревьев образуют хронологию с временным интервалом в 100 лет (1914–2013 гг.), а на польском участке 25 образцов образуют хронологию с временным интервалом в 100 лет (1914–2013 гг.). Межсерийная корреляция была низкой ($r = 0,13$, $p < 0,05$) (рисунок 2).

Межсерийная корреляция была низкой ($r = 0.13$, $p < 0.05$) (рисунок 2).

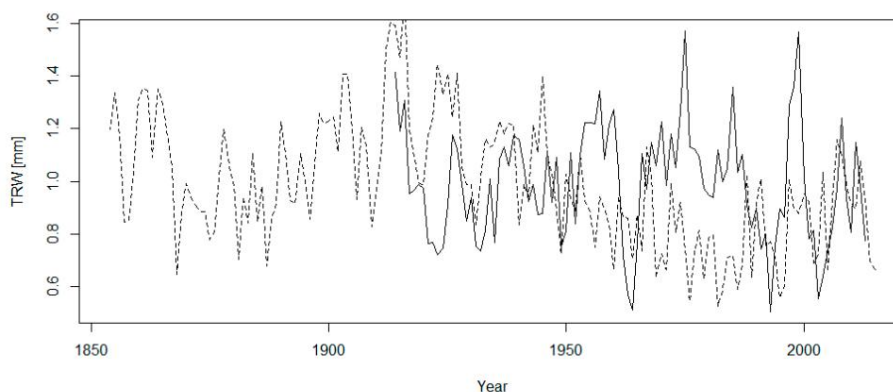


Рисунок 2. Ширина годовичных колец (TRW) сосны обыкновенной из Венгрии (сплошная линия) и Польши (пунктирная линия).

Наибольшее различие между двумя хронологиями было в средней ширине кольца. Годичные кольца на венгерском участке были в среднем почти на один миллиметр шире, чем на польском участке. Стандартное отклонение венгерский сайт был почти на один миллиметр шире в среднем, чем польский сайт. Стандарт также был выше на венгерском сайте, но автокорреляция и средняя чувствительность были схожими (таблица 2). отклонение также было выше на венгерском участке, но автокорреляция и средняя чувствительность были схожими

(таблица 2).

Таблица 2. Сравнение описательной статистики для обеих хронологий исходных данных. Корреляция с Мастером:

средняя корреляция каждой серии с основной хронологией, полученной из всех других серий; Стандарт

отклонения; годовые различия в среднем по годам; Автокорреляция; Влияние предыдущего года на рост текущего года; средняя чувствительность относительно изменения ширины кольца года к другим:

выраженный популяционный сигнал (EPS): связанный с климатом сигнал, сохраняющийся в
 влияние предыдущего года на рост текущего года; Средняя чувствительность: относительное изменение ряда индекса
 ширины колец в зависимости от климатического фактора
 климатический популяционный сигнал (CPS): климатически-связанный сигнал, сохраняющийся в индексном ряду.

Rbar: средняя межсерийная корреляция.

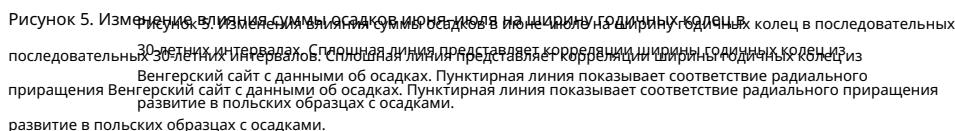
	Венгерский сайт	Польский сайт
Временной	1914–2013	1914–2013
Временной промежуток	1914–2013	1855–2015
Средняя корреляция с мастером	0,651	0,571
Корреляция с мастером	1,168	0,734
Стандартное отклонение	2,30	1,44
Средняя ширина	0,785	0,797
кольца Автокорреляция	1,168	0,734
Стандартное отклонение	0,234	0,244
Средняя чувствительность Автокорреляция	0,785	0,797
Выраженный популяционный сигнал (EPS)	0,9	0,87
Средняя чувствительность Rbar Expressed Population Signal (EPS)	0,244	0,244
Rbar	0,44	0,46

3.2. Связь между климатом и ростом

Значения между климатическим фактором и сигналом популяции (EPS) были выше общепринятого порогового значения 0,85. Это указывает на высокую степень общего воздействия [30]. Подобно EPS, средняя межсерийная корреляция на обоих участках выраженный популяционный сигнал (EPS) был выше общепринятого значения 0,85 (R_{bar}), а также продемонстрировал сильную связь между отдельными сериями со средними значениями 0,46 и 0,44 в Польше и Венгрии соответственно. Эти результаты показали, что оба исследования имели сходные значения и высокую степень общего воздействия и оказались пригодной для представления всего основного насасждения. Эти результаты показали, что согласно переменным климатическим факторам, оба исследования были пригодны для представления всей сосны 2,2 °C и годового количества осадков ниже (75 мм), чем в Табуе (таблица 1). Средняя температура самого влажного квартала в Венгрии была выше на 1,7 °C, но количество осадков было ниже на 43 мм. Средняя температура самого холодного квартала в Феньофо была на 3,1 °C выше, чем в Табуе.

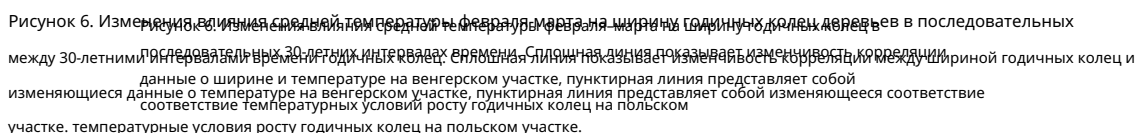
Хотя в связи между климатом и ростом в более длительных временных масштабах между участками наблюдались сходства, также наблюдались интересные временные различия. Осадки в июне и июле были важны для радиального прироста на обоих участках, но их роль существенно изменилась в

Хотя в более длительных временных масштабах наблюдалось сходство в связи между климатом и ростом между климатом и ростом, также наблюдались интересные временные различия. Осадки в июне и июле были важными факторами для радиального прироста развития на обоих участках, но его роль значительно изменилась в течение последних десятилетий. Тенденция к снижению количества осадков на обоих участках (рисунков 3 и 4) привела к ослаблению корреляции между климатом и ростом в Венгрии и Польше (рисунков 5). В Польше ослабление корреспонденции в Венгрии, но значительному росту корреляции в Польше (рисунков 5).



8 из 13

6). 100 лет (Рисунок 6).



Вопреки ожиданиям, наши результаты показывают, что различия в климатических условиях между нашим местом исследования в Польше и некоторыми другими местами в естественном ареале выше, чем между польским и венгерским местом (рисунок S1). Климатические условия в Миломлыне и Феньёфе включены в 95% изменчивости индексов BIOCLIM из всего естественного ареала. Этот результат согласуется с моделями экологических ниш, которые предполагают, что венгерский часток расположен в оптимальном или близком к оптимальному

4. Обсуждение

Вопреки ожиданиям, наши результаты показывают, что различия в климатических условиях между нашим местом исследования в Польше и некоторыми другими местами в естественном ареале выше, чем между польским и венгерским местом (рисунок S1). Климатические условия в Миломлыне и Феньофо включены в 95% изменчивости индексов BIOCLIM из всего естественного ареала. Этот результат согласуется с моделями экологической ниши, которые предполагают, что венгерский участок расположен в оптимальных или близких к оптимальным климатическим условиям для *P. sylvestris* [33]. Кроме того, естественное возобновление сосны обыкновенной в Феньофо подтверждает, что условия окружающей среды в этом регионе особенно благоприятны для этого вида. Высокое сходство между индексами BIOCLIM для двух мест исследования (рисунок S1, таблица 1) предполагает, что эти две популяции контролируются одними и теми же климатическими факторами.

Однако некоторые биоклиматические значения, рассматриваемые как ограничивающие факторы, могут быть менее благоприятны для установления и роста видов в Феньофо, чем в Миломлыне. Венгерский участок не только теплее, но и количество осадков там ниже в самый теплый период (таблица 1, рисунок S1). Исследования, проведенные на Пиренейском полуострове и в Монголии, показывают, что дефицит осадков летом может быть самым ограничивающим фактором для установления видов в самых южных районах, при этом низкое количество летних осадков напрямую приводит к высокой смертности семян [34–36]. Дефицит воды в самой теплой четверти также важен как ограничивающий фактор для радиального роста этого вида [7,8,37,38]. Это может быть самой важной причиной отсутствия местных популяций сосны обыкновенной в Венгрии. Однако климатические условия в Феньофо статистически не отличаются от климатических условий во всем естественном ареале (рисунок S1), что предполагает, что распространение сосны обыкновенной может быть ограничено другими факторами. В экологии общеизвестно, что в результате взаимодействия между видами реализованная ниша меньше потенциальной [39,40]. В случае этого вида для укоренения семян важны несколько биотических факторов, таких как наличие подходящей микросреды обитания, наличие густого травяного покрова, затеняющие деревья и хищники семян [34–36]. Интересно, что мы также обнаружили различия в показателях, связанных с зимними и ранневесенними температурами (таблица 1). Наши результаты согласуются с предыдущими исследованиями [5–7,41] о том, что эти факторы оказывают наибольшее влияние на формирование ширины годовых колец сосны обыкновенной. На польском участке значения минимальной температуры в самый холодный месяц и средней температуры в самый холодный квартал ниже, чем в Венгрии (таблица 1). Следовательно, зимние и ранневесенние метеорологические условия должны быть более благоприятными в западной Венгрии, чем в северной Польше. Как правило, участки в пределах естественного ареала больше подвержены влиянию осадков в самые теплые и самые влажные кварталы года. Даже если корреляция стока все еще высока, видны некоторые четкие различия. С точки зрения предыдущих результатов, решающие различия, по-видимому, относятся к минимальной температуре самых холодных месяцев, средней температуре самого холодного квартала и осадкам самого влажного и самого теплого квартала (таблица 1).

Согласно результатам анализа взаимосвязи между климатом и ростом, существуют аналогичные и различные эффекты в определенные месяцы формирования годовых колец деревьев. На низких высотах и в умеренном климате типично положительное доминирование летних осадков и отрицательное влияние более высокой летней температуры на рост деревьев, как ранее сообщалось для сосны обыкновенной (например, [37,38]) и других видов хвойных [42,43] в схожих климатических и экологических условиях с нашими участками. Наше исследование показывает, что эта закономерность сильнее на венгерском участке. Корреляционный анализ показывает, что для деревьев, растущих в Венгрии, летние осадки являются наиболее важным ограничивающим фактором, их количество в основном влияет на прирост роста (рисунок 3). Отрицательное влияние температуры преобладает в сентябре предыдущего года и августе текущего года (рисунок 4). Напротив, в Польше летние осадки оказывают меньшее влияние на рост деревьев и ограничиваются июнем и июлем, с некоторым остаточным влиянием в феврале (рисунок 3). Типичная отрицательная модель летней температуры отсутствует в этом наборе данных; было обнаружено, что влияние температуры было значительно отрицательным только в мае (рисунок 4). Эта разница между изменением ширины годовых колец и температурой может также отражать более высокую чувствительность к засухливости и летней засухе на венгерском участке. Температура февраля и марта является наиболее важным фактором в формировании годовых колец в Польше, но она также играет значительную роль в Венгрии (рисунок 4). Одним из объяснений этой прямой связи может быть повышенная потребность в фотосинтезе на ранней стадии вегетационного периода

поскольку более высокие зимние температуры уменьшают снежный покров и способствуют инфильтрации влаги в почву. Это приводит к более высокой скорости фотосинтеза в начале вегетационного периода [44].

В ходе анализа взаимосвязи между климатом и ростом временная стабильность обнаруженного соответствия всегда является основным вопросом. Параллельно с международными тенденциями [45–47], климат в наших местах исследования значительно изменился за последние 100 лет, что уже оказало значительное влияние на леса сосны обыкновенной в Венгрии [8,48,49]. Несмотря на повышение температуры в период с февраля по март, ее роль в росте годовых колец снижается с середины 20-го века. В то же время, как потепление, корреляции в обоих месяцах начали снижаться, и температура февраля и марта стала незначительным фактором с точки зрения изменения ширины годовых колец. Более ранние исследования [42,50] норвежской ели в низменной части Польши обнаружили такую же реакцию на потепление в период с конца зимы до начала весны. В этих исследованиях отмечалось, что это, вероятно, было результатом более высоких температур, нарушающих закаливание деревьев, так что они становятся более уязвимыми к заморозкам в конце зимы и начале весны. Похожий процесс наблюдался и в высоких северных широтах [51], где летняя температура является основным ограничивающим фактором роста деревьев. Согласно данным о ширине и плотности годовых колец, повышение температуры после 1950-х годов могло вызвать ослабление реакции между ростом годовых колец хвойных деревьев и средними летними температурами [52–54]. Это явление называется проблемой дивергенции. Хотя все еще есть вопросы относительно точного механизма этого явления, исследования D'Arrigo et al. [54] отметили, что температура сама по себе не всегда достаточна для характеристики тепловой среды деревьев, поскольку на них также влияют другие факторы, такие как влажность почвы, температура почвы или инсоляция. В то время как температурные условия в период с конца зимы до начала весны в значительной степени схожи, тенденции осадков в июне-июле значительно различаются, как и сила связи между влажностью и ростом деревьев летом. Зарегистрированная реакция насаждений венгерской сосны на снижение осадков соответствует нашим ожиданиям. В связи с подчеркнутой ролью летних осадков в росте годовых колец (особенно в июле) уменьшение осадков снизило их положительное влияние на развитие радиального прироста. Осадки в июне-июле оказывают меньшее влияние на рост деревьев на нашем польском участке в более длительной временной шкале, но интересно, что за последние 50 лет, несмотря на схожую тенденцию к снижению осадков, в Польше насаждения сосны совершенно по-другому отреагировали на эти изменяющиеся условия окружающей среды.

Такие изменения в соотношении климата и роста особенно важны, поскольку они влияют на наиболее важные периоды роста годовых колец на обоих участках и могут привести к сокращению роста в более длительной временной шкале. Как отметили Бауе и др. [55], тенденции роста годовых колец сосны обыкновенной будут существенно зависеть от места роста в будущем. В северной части Европы радиальные приросты, скорее всего, увеличатся, но в центральной и южной части континента прогнозируется сокращение роста [54]. Согласно Бауе и др. [55], рост может оставаться стабильным, если положительное влияние потепления зим сможет уравновесить отрицательное влияние летней засухи. Согласно нашим результатам, положительное влияние потепления зим не было обнаружено на венгерском участке, более того, роль более частых засушливых летних сезонов в формировании годовых колец неуклонно возрастает.

5. Выводы

Наше исследование показывает, что как биоклиматические предикторы, так и связь между климатом и ростом дают сопоставимые результаты в Венгрии и Польше. В нашем случае рост сосны обыкновенной контролируется схожими климатическими условиями, и реакция роста годовых колец на это аналогична. Поздняя зимняя и ранняя весенняя температура и летние осадки оказались наиболее важными факторами, контролирующими рост деревьев на обоих участках, но за последние 100 лет наблюдались временные различия. Потепление в феврале и марте вызвало ослабление корреляции между температурой и изменением ширины годовых колец в Венгрии и Польше, но уменьшение летних осадков привело к снижению реакции роста на венгерском участке, но с повышенной корреляцией с летними осадками на польском участке. Это исследование подтверждает предыдущие выводы о том, что реакция роста с точки зрения биомассы древесины может по-разному влиять на этот важный коммерческий вид в зависимости от определенных переменных, специфичных для участка.

Дополнительные материалы: Следующие материалы доступны в Интернете по адресу <http://www.mdpi.com/1999-4907/10/3/243/c1>, Рисунок S1. Сравнительный анализ наиболее ограничивающих значений BIOCLIM [19]: черный квадрат – Feny’of’o; черная точка – Табуж; серые точки – 273 местонахождения из всего ареала распространения *P. sylvestris* ssp. *sylvestris*, взятых из базы данных Conifers of the World [25]. Эллипсы указывают на 95% изменчивость климатических значений для всех мест отбора проб. Рисунок S2. Изменение суммы осадков с июня по июль в Феньофо (сплошная линия) и Мазурском поозерье (пунктирная линия). Средняя корреляция (r) между участками составляет 0,46 ($p < 0,05$). Рисунок S3. Изменение средней температуры с февраля по март в Феньофо (сплошная линия) и Мазурском поозерье (пунктирная линия). Средняя корреляция (r) между участками составляет 0,93 ($p < 0,05$).

Вклад автора: Концептуализация, DM, MK, RP; Формальный анализ, DM, RP и MK; Исследование, DM, RP и MK; Методология, DM, RP и MK; Написание — Первоначальный черновик, DM, RP и MK; Написание — Рецензирование и редактирование, CP и IR

Финансирование: RP и MK выражают благодарность за поддержку в виде гранта от Польского национального научного центра (2017/27/B/NZ8/00316).

Благодарности: Мы хотим поблагодарить руководство лесной инспекции Миломлына за разрешение провести исследование и предоставить нам необходимые данные. Это исследование связано с деятельностью, проводимой в рамках сети COST FP1106. Мы благодарим EUFORGEN за разрешение использовать карту распространения *P. sylvestris* (рисунок 1).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ссылки

1. Бялобок С., Боратынский, А.; Бугала, В. Биология Сосны Звичайней; Сорус: Познань, Курник, Польша, 1993; ISBN 8385599215. (На польском языке с аннотациями на английском языке).
2. Ривас-Мартинес, С.; Ривас-Саенс, С.; Пенас-Мерино, А. Всемирная система биоклиматической классификации. Глоб. Геобот. 2011, 1, 1–638.
3. Ханевинкель, М.; Кульманн, Д.А.; Шельхаас, М.-Й.; Набуурс, Г.-Й.; Циммерманн, Н.Е. Изменение климата может привести к серьезной потере экономической ценности европейских лесных угодий. Nat. Clim. Chang. 2012, 3, 203–207.
[Перекрестная ссылка]
4. Zielski, A.; Krapięć, M.; Koprowski, M. Дендрохронологические данные. В Polish Climate in European Context An Historical Overview; Przybylak, R., Majorowicz, J., Brázdil, R., Kejna, M., Eds.; Springer: Dordrecht, Нидерланды, 2010; стр. 87–100, ISBN 13: 9789048131662.
5. Керн З.; Патко, М.; Казмер, М.; Фекете, Дж.; Келе, С.; Палий, З. Множественные представители древесных колец (ширина ранней древесины, ширина поздней древесины и $\delta^{13}C$) из дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), Венгрия. Кват. Межд. 2013, 293, 257–267.
[Перекрестная ссылка]
6. Гарамсеги, Б.; Керн, З. Влияние климата на радиальный рост *Fagus sylvatica*, растущего вблизи границы своего распространения в горах Бюкк, Венгрия. Dendrobiology 2014, 72, 93–102. [\[CrossRef\]](#)
7. Миси, Д.; Нафради, К. Возможность идентификации негативных экстремальных климатических явлений с использованием годовичных колец *Pinus sylvestris* в Задунайском крае, Венгрия. Дендробиология 2016, 75, 45–54. [\[CrossRef\]](#)
8. Миси, Д.; Нафради, К. Реакция роста сосны обыкновенной на изменение климатических условий за последние 100 лет: исследование на примере Западной Венгрии. Trees Struct. Funct. 2017, 31, 919–928. [\[CrossRef\]](#)
9. Бауве, А.; Кох, М.; Калвайт, Р.; Конопацкий, А.; Штробах, Б.; Леннарц, Б. Реакция годовичных колец сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на климат и доступность почвенной влаги в низинах северо-восточной Германии. Балт. Для. 2013, 19, 212–225.
10. Макова, М. Дендроклиматологическое сравнение местной сосны обыкновенной и инвазивной сосны стробус в разных Места обитания в Чешской Республике. Preslia 2008, 80, 277–289.
11. Витас, А.; Эрлицките, Р. Влияние засух на радиальный рост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). (Братислава) 2008, 27, 367–378.
12. Ксенакис, Г.; Рэй, Д.; Менкукчини, М. Влияние климата и характеристик участка на рост сосны обыкновенной. Eur. J. Для Рез. 2012, 131, 427–439. [\[CrossRef\]](#)
13. Олексин, Дж.; Тьелькер, М.Г.; Райх, П.Б. Адаптация к изменяющейся среде в популяциях сосны обыкновенной широтный градиент. Сильва Фенн. 1998, 32, 129–140. [\[CrossRef\]](#)
14. Борхиди, А. Мадьяроршаг Новенитарсуласай; Akadémiai Kiadó : Будапешт, Венгрия, 2003 г. (на венгерском языке).
15. Майер, А. Фенивес и Баконьяльян; Akadémiai Kiadó : Будапешт, Венгрия, 1988 г. (на венгерском языке).
16. Dziekoński, H. Как были созданы сосновые насаждения Табужа? Sylwan 1994, 138, 47–55, (на польском языке с аннотацией на английском языке).

17. Стопа-Боричка, М.; Боричка, Дж.; Вавер, Дж.; Грабовска, К.; Добровольская, М.; Осовец, М.; Блазек, Э.; Склипчук Ю.; Ржеда, М. Климат северо-восточной Польши на основе физиографического отдела Я. Кондрацкого и Я. Островского в: Атлас взаимозависимости метеорологических и географических параметров в Польше; Факультет географии и регионоведения Варшавского университета : Варшава, Польша, 2013 г.; ISBN 9788363245528.
18. Харрис, И.; Джонс, П.Д.; Осборн, Т.Дж.; Листер, Д.Х. Обновленные сетки высокого разрешения ежемесячных климатических наблюдений — набор данных CRU TS3. 10. Int. J. Climatol. 2014, 642, 623–642. [\[CrossRef\]](#)
19. Хиджманс, Р. Дж.; Кэмерон, С. Э.; Парра, Дж. Л.; Джонс, П. Г.; Джарвис, А. Интерполированный климат с очень высоким разрешением поверхности для глобальных территорий суши. Int. J. Climatol. 2005, 25, 1965–1978. [\[CrossRef\]](#)
20. Vessella, F.; Schirone, B. Прогнозирование потенциального распространения *Quercus suber* в Италии на основе моделей экологических ниш: идеи сохранения и участие в лесовосстановлении. For. Ecol. Manag. 2013, 304, 150–161.
- [\[Перекрестная ссылка\]](#)
21. Крейлинг, Дж.; Бук, К.; Бакхаус, С.; Халлинггер, М.; Хубер, Г.; Хубер, Л.; Йенч, А.; Коннерт, М.; Тиль, Д.; Вильминг, М.; и др. Локальная адаптация к морозу в пограничных и центральных популяциях доминирующего лесного дерева *Fagus sylvatica* L. под воздействием температуры и экстремальной засухи в обычных садовых экспериментах. Экол. Эволюция. 2014, 4, 594–605. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
22. Бахофен, К.; Вольгемут, Т.; Газуль, Дж.; Мозер, Б. Холодные экстремальные температуры весной не ограничивают смещение ареала средиземноморских сосен в регионы с прерывистыми заморозками. Funct. Ecol. 2015, 30, 856–865.
- [\[Перекрестная ссылка\]](#)
23. Хиджманс, Р. Дж.; Гуарино, Л.; Круз, М.; Рохас, Э. Компьютерные инструменты для пространственного анализа генетических ресурсов растений данные: 1. DIVA-GIS. Генетика растений. Ресурс. 2001, 127, 15–19.
24. Хиджманс, Р. Дж.; Гуарино, Л.; Матур, П. DIVA-GIS Версия 7.5. Руководство 2012. Доступно онлайн: https://www.diva-gis.org/docs/DIVA-GIS_manual_7.pdf (дата обращения: 6 марта 2018 г.).
25. Фарджон, А.; Файлер, Д. Атлас хвойных растений мира. Анализ их распространения, биогеографии, разнообразия и Статус сохранения; Брилл: Лейден, Нидерланды; Бостон, Массачусетс, США, 2013; ISBN 9789004211803.
26. Ринн, Ф. Анализ и представление временных рядов TSAP-Win для дендрохронологии и смежных приложений. 2003. Доступно онлайн: www.rinntech.de (дата обращения: 6 марта 2018 г.).
27. Холмс, Р. Л. Компьютерный контроль качества при датировании и измерении колец деревьев. Tree-Ring Bull. 1983, 43, 69–78.
28. Кук, Э. Р.; Питерс, К. Сглаживающий сплайн: новый подход к стандартизации ширины годовичных колец внутри леса серия для дендроклиматических исследований. Tree-Ring Bull. 1981, 41, 45–53.
29. Кук, Э. Р. Подход к анализу временных рядов для стандартизации годовичных колец. Кандидатская диссертация, Университет Аризона, Тусон, Аризона, США, 1985 год.
30. Уигли, Т.; Бриффа, К.; Джонс, П. О среднем значении коррелированных временных рядов с приложениями в Дендроклиматология и гидрометеорология. J. Clim. Appl. Meteorol. 1984, 23, 201–213. [\[CrossRef\]](#)
31. Кук, Э.; Крушич, П. ARSTAN4.1b_XP 2006. Доступно онлайн: <http://Ideo.columbia.edu> (доступно на 6 марта 2018 г.).
32. Занг, К.; Бионди, Ф. treeclim: Пакет R для численной калибровки зависимостей прокси-климата. Экография 2015, 38, 431–436. [\[CrossRef\]](#)
33. Дюррант Хьюстон, Т.; де Риго, Д.; Каудулло, Г. Сосна обыкновенная в Европе: распространение, среда обитания, использование и угрозы. В Европейском атласе лесных пород деревьев; Сан-Мигель-Аянц, Дж., де Риго, Д., Каудулло, Г., Хьюстон Дюррант, Т., Маури, А., ред.; Издательское бюро Европейского союза: Люксембург, 2016; стр. 132–133.
34. Кастро, Дж.; Замора, Р.; Ходар, Дж. А. Механизмы, блокирующие колонизацию Средиземноморья *Pinus sylvestris* горные луга. J. Veg. Sci. 2002, 13, 725–731. [\[CrossRef\]](#)
35. Кастро, Дж.; Самора, Р.; Ходар, Дж. А.; Гомес, Дж. М.; Ходар, Дж. А.; Гомес, Дж. М. Укоренение семян бореального вида деревьев (*Pinus sylvestris*) на самой южной границе ареала: последствия нахождения в маргинальном средиземноморском местообитании. J. Ecol. 2004, 92, 266–277. [\[CrossRef\]](#)
36. Дуламсурэн, К.; Хаук, М.; Лейшнер, К. Появление всходов и укоренение *Pinus sylvestris* в Монгольский лесостепной экотон. Plant Ecol. 2013, 214, 139–152. [\[CrossRef\]](#)
37. Michelot, A.; Bréda, N.; Damesin, C.; Dufrêne, E. Различная реакция роста на климатические изменения и дефицит почвенной влаги у *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* и *Pinus sylvestris* в умеренном лесу. For. Ecol. Manag. 2012, 265, 161–171. [\[CrossRef\]](#)
38. Панайотов, М. П.; Зафиров, Н.; Керубини, П. Следы экстремальных климатических событий в кольцах деревьев *Pinus sylvestris* из Болгарии. Trees Struct. Funct. 2013, 27, 211–227. [\[CrossRef\]](#)

39. Хатчинсон, Г. Многомерная ниша. Заключительные замечания. *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* 1957, 22, 415–421. [\[CrossRef\]](#)
40. Бетаас, О. Р. Реализованные и потенциальные климатические ниши: сравнение четырех видов рододендронов. *J. Biogeogr.* 2002, 29, 545–554. [\[CrossRef\]](#)
41. Зельский А.; Кршапец, М.; Вильчинский, С.; Шиховска-Крапец, Е. Хронология радиального роста сосны обыкновенной. В Польше. *Sylvan* 2001, 145, 105–120, (на польском языке с аннотацией на английском языке).
42. Копровски, М. Пространственное распределение интродуцированной ели норвежской в низинной Польше: влияние меняющегося климата и экстремальных погодных явлений. *Quat. Int.* 2013, 283, 139–146. [\[CrossRef\]](#)
43. Бияк, С. Древесно-кольцевая хронология пихты белой и ее зависимость от климата Кашубского поозерья (северная Польша). *Geochronometria* 2010, 35, 91–94. [\[CrossRef\]](#)
44. Фриттс, Х. К. Годичные кольца деревьев и климат; Academic Press: Нью-Йорк, США, 1976.
45. Лютербахер, Дж.; Дитрих, Д.; Ксоплаки, Э.; Грожан, М.; Ваннер, Х. Европейские сезонные и годовые температурные колебания, тенденции и экстремальные значения с 1500 года. *Science* 2004, 303, 1499–1503. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
46. Хорлаки, Е.; Лутербачер, Дж.; Паэти, Н.; Дитрих, Д.; Штайнер, Н.; Гросжан, М.; Ваннер, Н. Изменчивость европейской весенней и осенней температуры и смена экстремальных значений за последние полтысячелетия. *Geophys. Res. Письмо* 2005, 32, L15713. [\[CrossRef\]](#)
47. Парри, М.; Парри, М.Л.; Канциани, О.; Палутикоф, Дж.; Ван дер Линден, П.; Хансон, К. Изменение климата 2007 г. — последствия, адаптация и уязвимость: вклад рабочей группы II в Четвертый оценочный доклад МГЭИК (т. 4); Cambridge University Press: Кембридж, Массачусетс, США, 2007.
48. Гуляш, К.; Бидло, А.; Хорват, А. Причины вымирания лесов в сосновом лесу (*Pinus sylvestris*) в Феньофё. В трудах по местным и региональным проблемам адаптации к изменению климата и зеленым технологиям, H-Sorpon, Венгрия, 19 сентября 2014 г.; Полгар, А., Базо, Т., Надь, Г., Галош, Б., ред.; Университет Западной Венгрии: Шопрон, Венгрия, 2014 г.
49. Миси, Д.; Нафрани, К. Температурные условия поздней зимы — ранней весны и их долгосрочное влияние на рост годичных колец в Венгрии. *Balt. For.* 2016, 22, 203–211.
50. Копровски, М.; Пржибылак, Р.; Зельский, А.; Поспешни́нска, А. Годичные кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как источник информации о климате в прошлом на севере Польши. *Int. J. Biometeorol.* 2012, 56, 1–10. [\[CrossRef\]](#)
51. Бриффа, К.Р.; Швайнгрубер, Ф.Н.; Джонс, П.Д.; Осборн, Т. Снижение чувствительности недавнего роста деревьев к температуре в высоких северных широтах. *Nature* 1998, 391, 678–682. [\[CrossRef\]](#)
52. Якоби, Г.С.; Д'Арриго, Р.Д. Ширина и плотность годичных колец деревьев свидетельствуют о климатических и потенциальных изменениях в лесах Аляска. *Глоб. Биогеохим. Циклы* 1995, 9, 227–234. [\[CrossRef\]](#)
53. Уилсон, Р. Дж.; Лакман, Б. Х. Дендроклиматическая реконструкция максимальных летних температур из участков верхней границы леса во внутренней части Британской Колумбии, Канада. *Голоцен* 2003, 13, 851–861. [\[CrossRef\]](#)
54. D'Arrigo, R.; Wilson, R.; Liepert, B.; Cherubini, P. О «проблеме расхождения» в северных лесах: обзор данных годичных колец и возможных причин. *Glob. Planet. Chang.* 2008, 60, 289–305. [\[CrossRef\]](#)
55. Бауве, А.; Юрасински, Г.; Шарнвебер, Т.; Шрёдер, К.; Леннарц, Б. Влияние изменения климата на рост годичных колец сосны обыкновенной, бука обыкновенного и дуба черешчатого на северо-востоке Германии. *IForest* 2016, 9, 1–11.

[\[Перекрестная ссылка\]](#)



© 2019 by authors. Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария. Данная статья является статьей открытого доступа, распространяемой на условиях Creative Commons Attribution

Лицензия (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).