

Реакция роста сосны обыкновенной на изменение климатических условий за последние 100 лет: исследование на примере Западной Венгрии

Давид Миси¹ · Каталин Нафради¹

Получено: 3 июня 2016 г. / Принято: 23 декабря 2016 г. / Опубликовано онлайн: 25 января 2017 г.
© Springer-Verlag Берлин-Гейдельберг 2017

Абстрактный

Ключевое сообщение Изменение климата оказывает значительное влияние на связь между климатом и ростом сосны обыкновенной в Западной Венгрии, и это обычно выражается в снижении прочности связи между изменением ширины годовичных колец деревьев и климатическими данными.

Аннотация Целью данной статьи является расширение нашего понимания взаимосвязи между климатом и ростом сосен в Задунайском регионе. Изменения влияния климата на рост деревьев в различных временных масштабах были предметом многочисленных исследований сосен, но эти взаимосвязи никогда не изучались для сосен в Венгрии. В этом исследовании значения корреляции Пирсона в 25-летних скользящих окнах использовались для оценки временных взаимосвязей температуры, осадков и изменения ширины годовичных колец, а также для изучения того, как они могут быть связаны с изменением климата между 1915 и 2014 годами.

В случаях летних осадков и температуры в конце зимы-начале весны наши результаты выявили значительное положительное влияние на развитие ширины годовичных колец у этих сосен в наших местах исследования. Кроме того, интенсивное потепление за последние 100 лет привело к изменению взаимосвязи между изменением ширины годовичных колец и климатическими данными. В этом исследовании временная нестабильность взаимосвязи между климатом и ростом наблюдалась в каждом важном месяце роста годовичных колец, а реакция роста на климат резко снижалась в большинстве изучаемых периодов. Это указывает на то, что продолжающееся изменение климата уже изменило

Взаимосвязь климата и роста сосны обыкновенной в некоторых районах Западной Венгрии.

Ключевые слова Дендроклиматология · Изменение климата · Взаимосвязь между климатом и ростом · Корреляция движущегося окна

Введение

Изменение климата, вместе с его побочными эффектами, оказывает значительное влияние на лесные экосистемы. Например, потепление может изменить начало вегетационного периода (Koprowski 2013), его продление (Menzel and Fabian 1999) и динамику формирования годовичных колец в течение активного периода (D'Arrigo et al. 2008; de Luis et al. 2014). Повышение температуры уже вызвало измеримые изменения в более крупном регионе, в котором расположены наши участки выборки. В Словении de Luis et al. (2014) сообщили о тенденции потепления и отметили, что долгосрочное повышение весенних температур ограничивает рост большинства видов деревьев, тем самым оказывая отрицательное влияние на продуктивность леса. Исследуя ель и лиственницу, Копровски (2012, 2013) также обнаружил значительную степень влияния, обусловленную изменением климатических условий в Польше, отметив, что повышение температуры в феврале и марте может снизить устойчивость деревьев к низким температурам, делая их более уязвимыми к заморозкам в конце зимы и начале весны. Напротив, Чуркова и др. (2014) в своем исследовании ели обнаружили, что повышение температуры весной оказывает положительное влияние на формирование годовичных колец в Швейцарских Альпах на больших высотах.

Поскольку сосна обыкновенная является одним из наиболее часто используемых видов для дендрохронологического анализа, ее связь с климатом и ростом исследовалась много раз в различных климатических, экологических и высотных условиях (Sánchez-Salguero et al. 2015; Bauwe et al. 2015; Bauwe

Сообщение от С. Ливитта.

* Давид Миси
misid@geo.u-szeged.hu

¹ Кафедра геологии и палеонтологии, Сегедский университет,
Egyetem utca 2-6, Сегед 6722, Венгрия

и др. 2013; Панайотов и др. 2013; Богино и др. 2009; Пэрн 2009; Эйльманн и др. 2006). В отношении текущих климатических тенденций были зарегистрированы и оценены различные недавние и будущие реакции. Хотя способность сосны обыкновенной адаптироваться к изменчивым климатическим и экологическим условиям велика, в результате потепления прогнозируются тенденции снижения роста этого вида в центральной и южной Европе (Райх и Олексин 2008).

Хотя изменение климата может иметь серьезные последствия в Карпатском бассейне (Parry et al. 2007; Bozó 2010), которые могут существенно повлиять на лесную экосистему, было проведено мало исследований временных изменений в отношениях между климатом и ростом определенных видов деревьев (например, бука, Garamszegi and Kern 2014), и их особенно не хватает для сосен (за исключением Misi and Náfrádi 2016b). Из видов сосен в Венгрии сосна обыкновенная представляет собой самую большую группу, и хотя она не является местной, она играет существенную роль в составе венгерских лесов (NFC SO Forestry Directorate Forest Inventory 2014). Чтобы оценить поведение изменения ширины годовых колец сосны обыкновенной, для исследования были выбраны два хорошо известных участка, покрытых сосной, из западной части Венгрии. Участки были выбраны с целью исследования связи роста сосны обыкновенной с климатом в схожих климатических условиях, но с разной средой роста. Хотя участки расположены относительно близко друг к другу, текущее состояние двух насаждений отличается в основном их различными почвенными условиями и режимами управления водными ресурсами. Текущее исследование направлено на (1) определение того, какие климатические параметры влияют на изменение ширины годовых колец на наших участках, и впоследствии (2) изучение того, как это влияние

Изменение климатических условий за последние 100 лет претерпело изменения и изменило взаимосвязь между климатом и ростом.

Материалы и методы

Данные о месте исследования и климате

Одним из участков нашего исследования является Феньёфё (FFO, N47°21', E17°45', 250 м над уровнем моря), расположенный в северной части Западной Венгрии на северных склонах гор Баконь (рис. 1а). Этот лес, являющийся старейшим сосновым насаждением в Венгрии, растет на вторично эволюционировавшем дюнном песке и слабогумусной песчаной почве, образованной из известнякового песчаного основания (Borhidi 2003). Из-за толстого слоя песка и интенсивного летнего испарения уровень грунтовых вод обычно опускается ниже корней, что способствует плохому управлению водными ресурсами и неблагоприятным условиям для роста деревьев. Лес смешанный, с дубом (*Quercus cerris*, *Quercus robur*, *Quercus petraea*), березой повислой (*Betula pendula*) и ясенем (*Fraxinus ornus*), но в пологе преобладает популяция сосны разного возраста.

Второй участок — Салафё (SZFO, N46°52', E16°21', 270 м над уровнем моря), расположен в западной части страны, недалеко от австрийской и словенской границ. Почвенные условия на этом участке лучше; преобладающая почва — бурая лесная почва, образованная на четвертичных отложениях. Доминирующей породой является сосна обыкновенная, но лес смешанный: произрастают дуб, береза, ясень, бук (*Fagus sylvatica*) и ель (*Picea abies*).

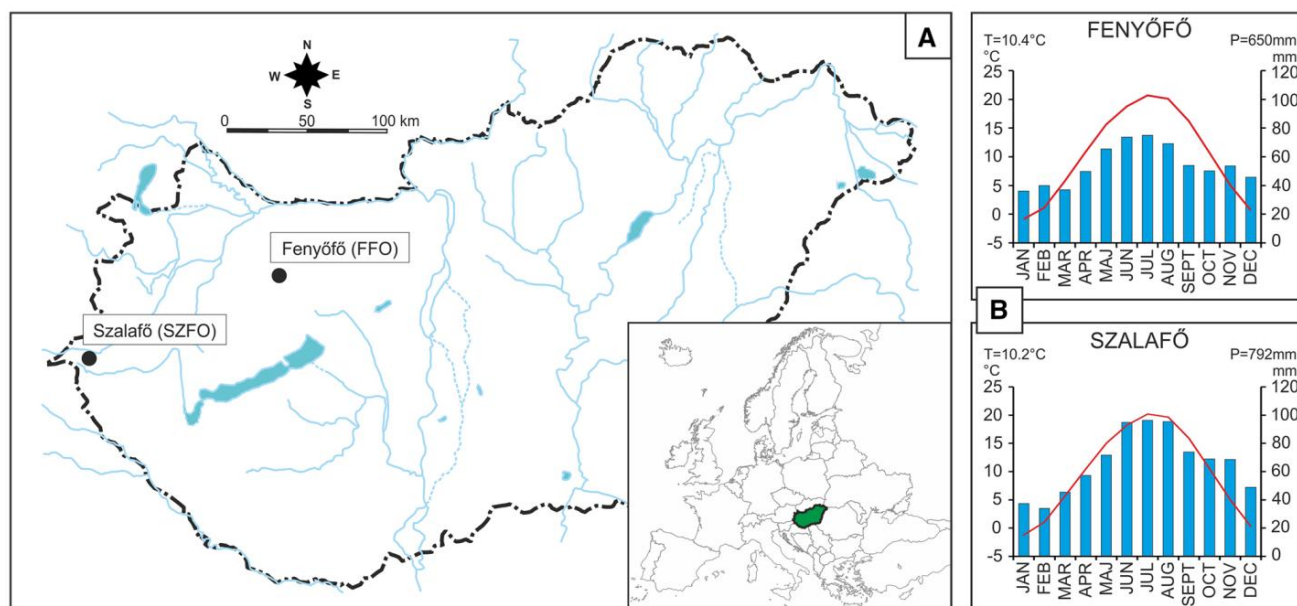


Рис. 1 Расположение пунктов исследований (а) и многолетние характеристики температуры (линии) и осадков (столбики) (б)

В обоих районах максимумы осадков и температуры приходятся на лето, а годовое распределение значений температуры и осадков схоже. На

участке SZFO общее количество осадков выше (~800 мм) с максимумом в июле, но участок FFO теплее, его долгосрочная среднегодовая температура составляет 10,4 °C (рис. 1b).

Поскольку ближайшие метеорологические станции не имеют достаточно длинных инструментальных метеорологических данных для нашего исследования, мы использовали сеточные ежемесячные и сезонные данные о температуре и осадках CRU TS 3.23 0.5°×0.5° (Harris and Jones 2015) за период 1915–2014 гг. Необходимый нам набор данных был извлечен для выборочных территорий с помощью веб-страницы KNMI Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl>).

Для проверки надежности данных, привязанных к сетке, они были сравнены с более краткосрочными инструментальными данными, уже предоставленными станциями вблизи мест исследования; была обнаружена высокая корреляция для перекрывающихся периодов.

Климат за последние 100 лет

Согласно температурным данным участков FFO и SZFO, примечательная тенденция к потеплению началась в начале 1990-х годов. За некоторыми исключениями, температура первых 75 лет нашего периода исследования упала ниже среднего значения за базовый период 1971–2000 гг. (рис. 2), особенно зимой между 1940 и 1964 гг., которая оказалась самой холодной эпохой за последние 100 лет. Однако после 1990 г. температура превышала среднее значение за базовый период в каждом месяце на обоих участках исследования. Самые большие изменения произошли в апреле, в летние месяцы и в ноябре. Зимы также были значительно теплее. В период с 1990 по 2014 гг. 25-летняя средняя температура зимних месяцев не опускалась ниже 0 °C (за исключением декабря на участке FFO).

В месячных значениях осадков наблюдаются лишь небольшие колебания, но по сезонам и годам наблюдаются



Рис. 2 Аномалии температуры и осадков за последние 100 лет по отношению к базовому периоду 1971–2000 гг. вместе с индексом засушливости для каждого исследуемого участка. Временные изменения засушливости были исследованы с использованием расчета 25-летнего скользящего среднего для каждого сезона

существенные изменения. Рассматривая месяцы по отдельности, наибольшее уменьшение осадков наблюдалось в апреле и октябре на обоих участках, а в августе на участке СЗФО (рис. 2).

Однако в тенденциях сезонных данных об осадках наблюдается иная картина. В то время как летние осадки увеличиваются с начала 1900-х годов на участке FFO, на участке SZFO наблюдается противоположная тенденция, при этом происходит их значительное снижение. Среднее значение первого 25-летнего периода (1915–1939 гг.), 848 мм, снизилось почти на 80 мм к концу последнего квартала периода исследования (1990–2014 гг.: 770 мм).

Казалось вероятным, что небольшое уменьшение количества осадков и резкое повышение температуры будут объединены в резко растущий индекс засушливости. Как показывают 25-летние скользящие средние значения индекса засушливости за последние 100 лет, климатические условия быстро изменились в обоих местах (рис. 2). До 1990 года индексы засушливости обычно были ниже уровня 1971–2000 годов как весной, так и летом, и именно эти сезоны особенно важны для роста годовичных колец деревьев. Из-за тенденции к потеплению значение индекса засушливости каждого сезона значительно поднялось выше среднего значения за базовый период к концу периода нашего исследования.

Выборка и построение хронологии

В двух периодах отбора проб (в 2014 году на участке FFO; в 2015 году на участке SZFO) для отбора проб были выбраны старые, доминирующие, здоровые деревья. Всего было отобрано 53 особи на высоте груди, и два образца были взяты под углом 180° друг к другу на каждом дереве. Все образцы были высушены на воздухе, затем отшлифованы и отполированы 8 различными наждачными бумагами для улучшения структуры годовичных колец. Измерение ширины годовичных колец проводилось с помощью измерительной станции LINTAB с точностью 0,01 мм от сердцевины до коры (Rinn 2003). Кольца, сформированные до 1915 года, были исключены, что означает начало нашего периода исследования. Экранное перекрестное датирование отдельных серий было выполнено с использованием программ TSAPX и TSAP-Win. Интеркорреляция серий, идентификация отсутствующих колец и обнаружение возможных ошибок датирования были проверены с использованием программы COFESHA (Holmes 1983).

Климатический сигнал

Из-за возраста деревьев, размера и эффектов динамики насаждения в кольцах деревьев сохраняются несколько неклиматических трендов, и их необходимо удалить. Поэтому все ряды были стандартизированы путем подгонки кубического сглаживающего сплайна с 50% частотной характеристикой на 67% длины отдельного ряда (Кук и Питерс, 1981). Автокорреляция была удалена из каждого отдельного индекса, затем все детрендрованные остаточные ряды были усреднены в хронологию участка с использованием двухвеса надежного среднего (Кук, 1985).

Стабильность общего сигнала, сохраненного в индексном ряду, определялась путем расчета выраженного популяционного сигнала (EPS), который применялся с 25-летним окном с задержкой в 1 год с использованием общепринятого порогового значения 0,85 (Wigley et al. 1984). Кроме того, средняя межсерийная корреляция (Rbar) вычислялась с использованием того же окна и запаздывания, что и значения EPS. Процедуры стандартизации и расчета индекса проводились с использованием программы ARSTAN (Cook and Krusic 2006).

Чтобы оценить связь между климатическими данными и Индексы годовичных колец, коэффициенты корреляции Пирсона были рассчитаны с мая предыдущего года (MAY) по октябрь текущего года (Oct) формирования годовичных колец. Анализировались не только отдельные месяцы, но и все сезонные и годовые данные. Для исследования влияния изменения климатических условий на рост годовичных колец в течение периода исследования были рассчитаны 25-летние скользящие оконные корреляции метеорологических данных и данных о ширине годовичных колец.

Учитывались только те месяцы и периоды, в которые осадки или температура имели значимое или почти значимое соответствие с индексами годовичных колец деревьев за весь период исследования.

Не только осадки и температура были исследованы по отдельности, но также был рассчитан индекс засушливости (AI), чтобы подчеркнуть влияние условий засухи на изменчивость ширины годовичных колец деревьев. Расчеты проводились с использованием аномалий осадков и температуры в соответствии со следующей формулой

$$AI = ((T - T_m) - T_d) - ((P - P_m) - P_d)$$

где T — температура, T_m — средняя температура базисного периода (1971–2000), T_d — отклонение температуры базисного периода, P — осадки, P_m

- среднее количество осадков за базовый период, а P_d - отклонение количества осадков за базовый период. Значения этого индекса положительны в случае засушливых явлений.

Расчет производился для каждого месяца текущего года формирования годовичных колец, для всех сезонов и для годовых данных.

Значения ИИ были проверены на основе метеорологических данных с использованием корреляции Пирсона.

Результаты

Древесные хронологии

Были разработаны две хронологии участков: одна для участка FFO, полученная из ширины годовичных колец 19 деревьев, и другая для участка SZFO, включающая данные по 34 деревьям. Исходные хронологии показывают высокий уровень сходства друг с другом с корреляцией r=0,66. Только небольшие различия можно найти в наиболее распространенных статистических показателях, таких как стандартное отклонение, средняя длина сегмента, ряд

Интеркорреляция и автокорреляция (таблица 1). Хронология участка для FFO начинается с 5 деревьев в 1915 году и достигает максимума репликации в 1982 году. Репликация в хронологии SZFO начинается с 10 деревьев с сердцевинной в начале записи и достигает максимума в 1960 году.

Взаимосвязь между климатом и ростом

Значения выраженного популяционного сигнала (EPS) указывают на стабильный и сильный общий сигнал на обоих участках. Значения превышают общепринятый порог 0,85 и также превышают рекомендуемый в настоящее время более высокий критический уровень (около 0,90) (Méríán et al. 2013) (рис. 3e). Подобно случаю EPS, средняя межсерийная корреляция (Rbar) также указывает на сильные связи между отдельными сериями со средними значениями 0,43 (SZFO) и 0,44 (FFO). Эти результаты свидетельствуют о том, что обе хронологии несут надежный климатический сигнал и подходят для представления всего соснового насаждения.

Согласно результатам корреляционного анализа между индексами годовичных колец и климатическими данными, рост на наших участках хорошо соответствовал метеорологическим условиям. Рассматривая месяцы по отдельности, осадки в июне и июле оказывают наибольшее положительное влияние на изменение ширины годовичных колец, но в более длительном временном масштабе наибольшее влияние оказывают общие осадки лета (рис. 4). Наибольшее влияние температуры отрицательно в августе, но соответствие положительно в феврале и марте. Хотя температура играет второстепенную роль в развитии ширины годовичных колец, ее влияние на доступные осадки особенно важно. Связь между данными годовичных колец и индексом засушливости показывает наибольшую степень отрицательной корреляции в объединенный летний период (рис. 4). Также примечательно, что зимой более высокие значения засушливости играют положительную роль в ширине годовичных колец сосны обыкновенной на наших участках.

Скользящее окно использовалось для определения того, как изменения климатических условий за последние 100 лет повлияли на изменчивость ширины годовичных колец в долгосрочной перспективе. В начале этих 100 лет температура оказывала значительное влияние на изменчивость ширины годовичных колец в большинстве исследованных периодов, но временная стабильность каждого сигнала оказалась слабой. Параллельно с ускоряющимся потеплением на участках исследования исчезает значимость связи между температурой и шириной годовичных колец. Наибольшее снижение корреляции между годовичным приростом и температурой произошло в марте, но сила

Связи также снизились в июле и в зимний период (рис. 5). Важно отметить, что участки были затронуты по-разному. Например, в июле на участке FFO температура ни разу не превышала уровень значимости, поэтому снижение корреляции имело меньшее влияние. В случае осадков была обнаружена высокая степень нестабильности сигнала.

Поскольку анализ отдельного месяца июля показал самую высокую корреляцию с ростом деревьев за весь период исследования, удивительно, что сильная связь, существовавшая в первой части 100-летнего периода, падает ниже уровня значимости к концу записи. Однако в сезонном масштабе влияние осадков сохранялось благодаря тенденции к росту значений корреляции июньских осадков и даже августовских осадков на участке SZFO.

Обсуждение

Параллельно с международными тенденциями (Люттербахер и др. 2004; Хорлаки 2005; Parry 2007; de Luis et al. 2014; Koprowski 2012), климат наших исследовательских участков в Западной Венгрии значительно изменился за последние 100 лет, что уже оказало заметное влияние на сосновые леса (Gulyás et al. 2014; Misi and Nádrádi 2016a, b), и этот процесс, скорее всего, продолжится в будущем (Bozó

2010; Náfrádi et al. 2013). Зависимость климата от роста, наблюдаемая в индексах годовичных колец на наших участках исследования, типична для районов с низкими высотами и умеренным климатом с положительным преобладанием летних осадков и отрицательным максимальным соответствием летней температуре. Подобное поведение таких параметров ранее было отмечено в Венгрии в случае других видов (например, Garamszegi и Kern 2014; Kern et al. 2013), и наблюдалось за пределами Венгрии в случае сосны обыкновенной (например, Michelot et al. 2012; Panayotov et al. 2013) и других видов хвойных (например, Koprowski 2012, 2013; Bijak 2010), все случаи в аналогичных климатических и экологических условиях, что и на участках. Наши результаты указывают на количество

осадков июля является наиболее важным ограничивающим фактором в росте годовичных колец деревьев за весь период исследования. В августе и особенно в июне количество осадков также значительно коррелирует, но с меньшим весом. Хотя климатические условия предыдущих лет обычно имеют важное значение для роста деревьев в текущем исследовании, только осадки предыдущего

Таблица 1 Дендрохронологическая статистика для двух хронологий сосны обыкновенной

Название сайта	Длина	Количество деревьев	CwM	MRW (мм)	MS	SD	AC1	MEPS	MRbar
Феньёфо (FFO) 1914–2013	19	0,651	2,36	0,234	1,168	0,785	0,97	0,44	
Салафе (SZFO) 1915–2014 гг.	34	0,637	2,62	0,224	1,382	0,832	0,96	0,43	

Корреляция CwM с мастером, средняя ширина кольца MRW , средняя чувствительность MS , стандартное отклонение SD , AC1 автокорреляция первого порядка, MEPS среднее EPS, MRbar среднее Rbar

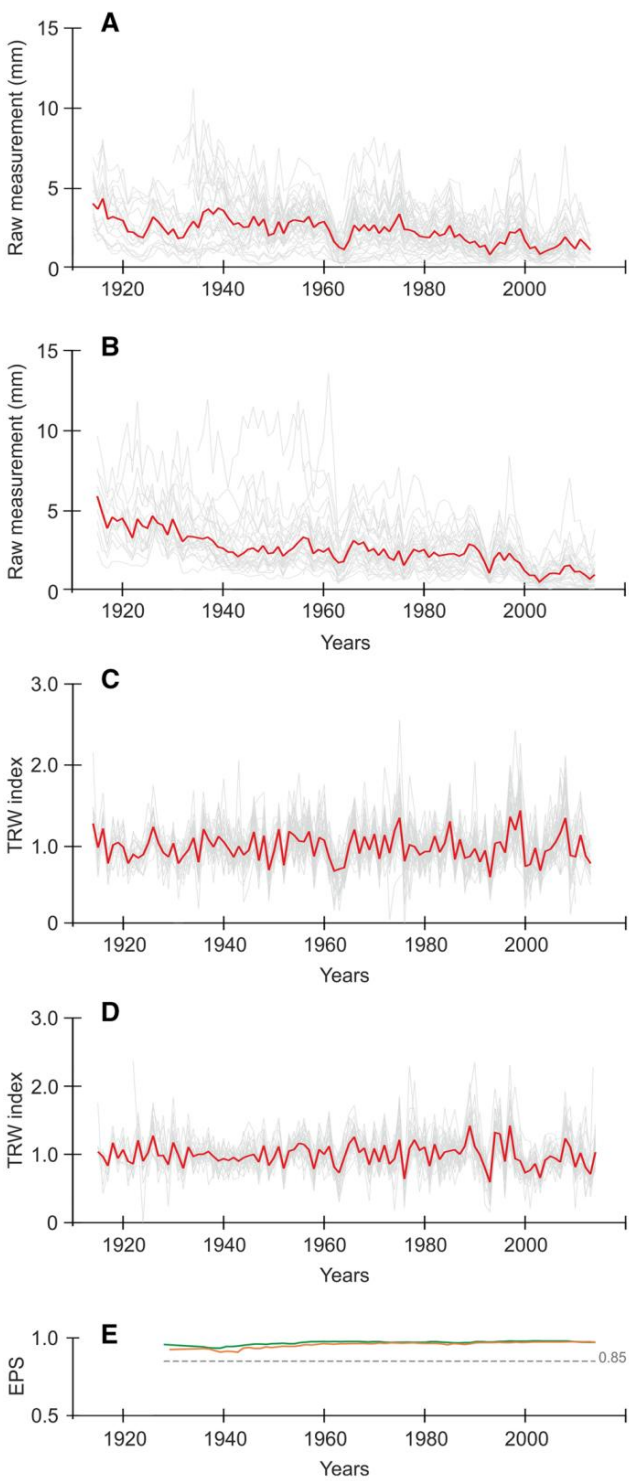


Рис. 3. Исходные (a, b) и остаточные (c, d) хронологии участков SZFO (Szalafő) и FFO (Fenyőfő). Значения EPS (e) указывают на стабильность климатически-связанного сигнала в серии годовых колец, горизонтальная пунктирная линия отмечает общепринятый порог 0,85.

Сентябрь был значимым на участке FFO. Температура, с ее отрицательным влиянием на формирование годовых колец, доминирует в августе, но ее значение ниже, чем ожидалось.

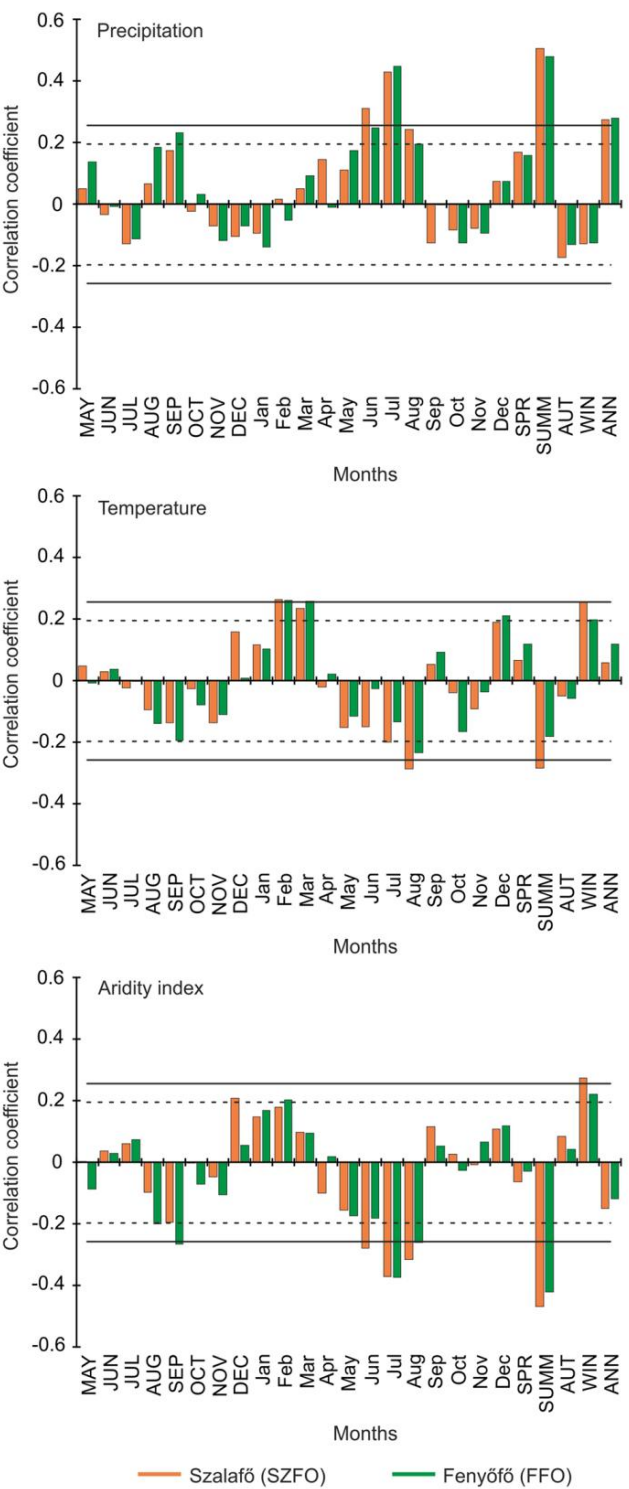


Рис. 4 Корреляции Пирсона между осадками, температурой, индексом засухи и остаточными данными годовых колец. Пунктирные ($p < 0,05$) и сплошные ($p < 0,01$) горизонтальные линии указывают уровень значимости

особенно на участке FFO, где роль сезонной летней температуры не превысила уровня значимости ($p < 0,05$) (рис. 4). Влияние температуры на рост деревьев

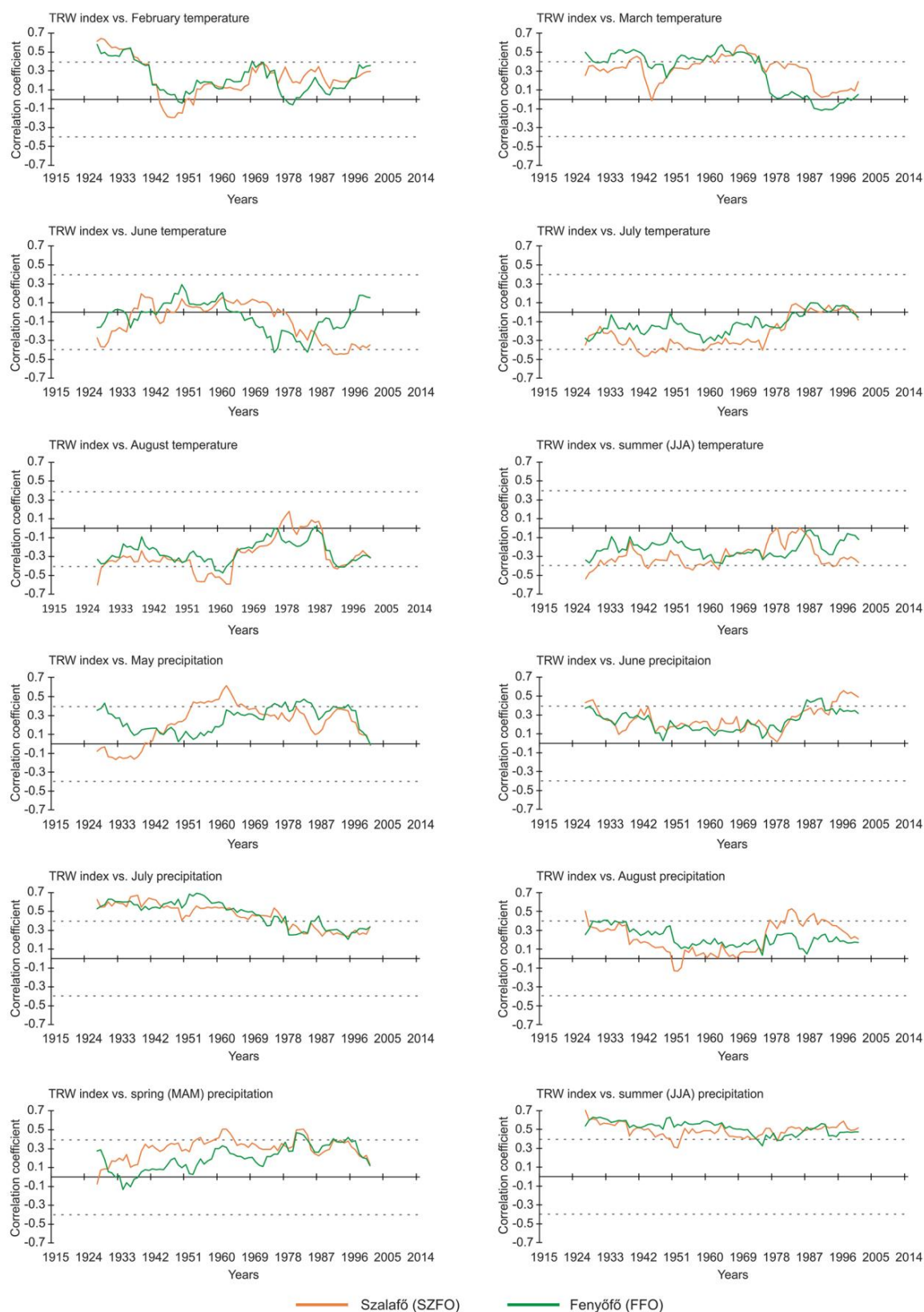


Рис. 5 Результаты корреляции 25-летнего скользящего окна между изменением ширины годовичных колец и климатическими данными в различные периоды года. Горизонтальные пунктирные линии обозначают уровень значимости $p < 0.05$.

в гораздо большей степени подчеркивается в корреляциях с индексом засушливости. В этом случае почти все летние месяцы находятся выше уровня значимости (единственным исключением является июнь на участке FFO). Этот результат показывает, что летняя температура играет особенно важную роль в изменении ширины годовых колец, в частности, из-за ее влияния на полезное количество осадков. Помимо лета, значимая связь между температурой и шириной годовых колец может быть обнаружена в феврале и марте. Этот результат очень необычен, поскольку ни в одной другой статье не сообщалось о подобной картине в Венгрии (например, Керн и др. 2009, 2013; Гарамзеги и Керн 2014). Однако важно отметить, что эти исследования проводились на буке и дубе. Из региона, в котором расположена страна, некоторые авторы наблюдали схожую зависимость для лиственницы (Koprowski 2012, 2013), для черной сосны (Poljanšek et al. 2013) и для елей (Bošel'a et al. 2013), но в целом из районов с другим климатом или на большей высоте. Это положительное влияние в период поздней зимы - ранней весны, скорее всего, можно объяснить существенной ролью температуры в начале формирования годовых колец.

Временная стабильность связи между климатом и ростом различных видов деревьев исследовалась много раз (например, D'Arrigo 2008; Pärn 2009; Koprowski 2012, 2013). На наших участках именно изменяющиеся условия поздней зимы - ранней весны и лета вносят свой вклад в изменяющуюся реакцию. Несмотря на повышение температуры, ее роль в росте годовых колец снижается с середины 20-го века. Наибольшее снижение произошло в случае февраля и марта, когда в первой части нашего исследования наблюдалась сильная положительная связь ($r > 0,4$) (рис. 5). Параллельно с интенсивным потеплением корреляции в обоих месяцах начали снижаться, и температура февраля и марта стала незначительным фактором с точки зрения изменения ширины годовых колец. Копровски (2012, 2013) обнаружил такую же реакцию на потепление в период поздней зимы - ранней весны у хвойных деревьев в низменной части Польши. В этих работах он отмечает, что из-за повышения температуры может не только исчезнуть корреляция между ростом годовых колец и температурой, но и потепление может иметь побочный эффект, который существенно изменяет нормальное развитие годовых колец в виде снижения устойчивости к низким температурам. Это происходит в результате того, что более высокие температуры нарушают закалывание деревьев, так что они становятся более уязвимыми к заморозкам поздней зимы - ранней весны. Похожий процесс наблюдался и в высоких северных широтах (Brifa et al. 1998), где летняя температура является основным ограничивающим фактором роста деревьев. Согласно данным о ширине и плотности годовых колец, повышение температуры после 1950-х годов вызвало ослабление реакции между ростом годовых колец хвойных деревьев и средними летними температурами (Jacoby and D'Arrigo 1995; Wilson and Luckman 2003; D'Arrigo et al. 2008). Это явление

называемая «проблемой расхождения». Хотя все еще есть вопросы относительно точного механизма этого явления, Д'Арриго и др. (2008) 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. На наших участках мы также наблюдали снижение кор-

Реакция между температурой и изменчивостью ширины годовых колец в августе и особенно в июле (рис. 5). Июнь — единственный летний месяц, особенно на участке SZFO, влияние которого на ширину годовых колец увеличилось. Летняя температура была не единственной, в которой наблюдалось снижение корреляции. В течение первой половины прошлого столетия зимняя температура имела относительно стабильную положительную связь с нашими индексами ширины годовых колец сосны обыкновенной, но к концу 1990-х годов она полностью исчезла; более того, на короткое время связь стала почти существенно отрицательной на участке FFO.

В целом, количество осадков в каждом месяце и сезоне уменьшалось в нашем анализе скользящего окна, но это породило различные соответствия с вариациями ширины годовых колец сосны обыкновенной. Например, уменьшение количества осадков в мае, июне, августе и весной привело к более сильным корреляциям с индексами ширины годовых колец, что может быть побочным продуктом резкого снижения связи между осадками в июле и ростом годовых колец. Поскольку осадки в июле были наиболее важным фактором развития ширины годовых колец в течение большей части последних 100 лет, ослабление их роли могло усилить важность условий осадков в другие периоды. Корреляция как июньских, так и августовских осадков превысила уровень значимости, тогда как июль оказался ниже него (рис. 5). Следовательно, значительная степень снижения корреляции произошла в том, что было самым важным месяцем, но стабильная положительная корреляция сохранилась для летнего периода в целом.

В то же время, улучшение корреляций с осадками в июне и августе не повлияло на оба участка в равной степени и, судя по всему, не сохранился. Августовская корреляция упала ниже уровня значимости к концу 1990-х годов, и в настоящее время, похоже, июль также демонстрирует тенденцию к снижению.

Таким образом, влияние изменения климата на тенденции роста сосны обыкновенной в наших местах исследования ясно видно. Бауве и др. (2015) отмечают, что в северной Германии снижение роста годовых колец сосны обыкновенной, вероятно, будет умеренным в будущем, если положительный эффект повышения зимних температур сможет уравновесить отрицательный эффект летних засух. Хотя это исследование проводилось в схожих климатических и экологических условиях,

В отличие от текущего, на наших участках не наблюдалось увеличения положительного влияния зимней температуры на развитие ширины годовых колец, что, по-видимому, прогнозирует продолжающееся отрицательное влияние потепления и более частое

возникающие засухи на динамику роста и изменение ширины годовичных колец деревьев.

Заключение

Целью данного исследования было изучение климатических параметров, которые являются основными ограничивающими факторами в развитии ширины годовичных колец сосны обыкновенной, и оценка временной стабильности связи между климатом и ростом в свете изменения климата за последние 100 лет. Наши результаты показывают, что повышение температуры и уменьшение количества осадков, наблюдающееся в Венгрии, кардинально изменят рост деревьев. Ранее доминирующая роль июльских осадков как наиболее важного ограничивающего фактора в изменении ширины годовичных колец была вытеснена осадками в июне и августе. Однако дальнейшее снижение количества осадков может, в свою очередь, изменить их важность. Несмотря на повышение температуры, роль температуры как в период поздней зимы - ранней весны, так и летом снижается. Тот же процесс наблюдался в случае хвойных деревьев в Польше Копровским (2012, 2013), а также в высоких широтах многочисленными авторами (например, Брифа и др., 1998; Ваганов и др.

1999 год; Брифа 2000; Д'Арриго и др. 2004).

Заявление о вкладе автора Дэвид Миси задумал структуру и идею статьи, выполнил основную часть сбора образцов и данных, анализа данных и написания статьи. Каталин Нафрази внесла вклад в сбор образцов и написание статьи.

Благодарности Авторы хотели бы выразить свою благодарность г-же Рите Маркус и г-ну Сабольчу Борке за их неоценимую помощь во время отбора проб, а также г-ну Золтану Керну за организацию подготовки проб и измерений. Мы также хотели бы поблагодарить двух рецензентов и редактора этой статьи за их ценные советы и комментарии.

Соблюдение этических норм

Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ссылки

- Бауве А., Юрасински Г., Шарнвебер Т., Шредер К., Леннарц Б. (2015) Влияние изменения климата на рост годовичных колец сосны обыкновенной, бука обыкновенного и дуба черешчатого на северо-востоке Германии. *iForest* 9:1–11. doi:10.3832/for1421-008
- Бауве А., Кох М., Калвайт Р., Конопацкий А., Штробах Б., Леннарц Б. (2013) Реакция годовичных колец сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на климат и доступность почвенной влаги в низинах северо-восточной Германии. *Baltic For* 19:212–225.

- Бияк С. (2010) Древесная хронология серебряного fir и ее зависимость от климата Кашубского поозерья (Северная Польша). *Геохронометрия* 35:91–94. doi:10.2478/v10003-010-0001-9
- Bogino S, Fernández MJ, Bravo F (2009) Влияние климата на радиальный рост *Pinus sylvestris* на южных и западных границах ареала. *Silva Fenn* 43(4):609–623.
- Борхиди А (2003) Magyarország növényfajátársulásai. Академия Киадо, Будапешт
- Бозо Л (2010) Kö nyezetű jő vőkő – Kö nyezet-é klí mabizottság (Эд). МТА, Будапешт
- Бошеля М, Седмак Р, Седмаркова Д, Марушак Р, Кулла Л (2013) Временные сдвиги в отношениях между климатом и ростом норвежской ели как индикатор ухудшения здоровья в Бескидах, Словакия. *Для Ecol Manag* 325: 108–117. doi:10.1016/j.foreco.2014.03.055
- Брифа К (2000) Ежегодная изменчивость климата в голоцене: интерпретация послания древних деревьев *Quat Sci Rev* 19:87–105. doi:10.1016/S0277-3791(99)00056-6
- Brifa K, Schweingruber F, Jones P, Osborn T (1998) Снижение чувствительности недавнего роста деревьев к температуре в высоких северных широтах. *Nature* 391:65–73. doi:10.1038/35596
- Чуркова О.В., Эугстер В., Зилис С., Керубини П., Этцольд С., Заурер М., Зигвольф Р., Бухман Н. (2014) Повышение значимости весенних температур для деревьев норвежской ели в Давосе, Швейцария, после 1950-х годов. *Trees Struct Funct* 28:183–191. doi:10.1007/s00468-013-0941-6
- Кук Э.Р., Питерс К. (1981) Сглаживающий сплайн: новый подход к стандартизации ряда ширины годовичных колец внутри леса для дендроклиматических исследований. *Tree-Ring Bull* 41: 45–53.
- Кук Э.Р. (1985) Подход к анализу временных рядов для стандартизации годовичных колец деревьев. Диссертация, Университет Аризоны, Тусон
- Кук Э.Р., Крушич П.Дж. (2006) ARSTAN4.1b_XP. <http://www.ideo.columbia.edu>.
- D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P (2008) О «проблеме расхождения» в северных лесах: обзор данных годовичных колец и возможных причин. *Glob Planet Change* 60:289–305. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.03.004
- Д'Арриго Р., Кауфманн Р., Дэви Н., Якоби Г., Ласковски К., Минени Р., Керубини П. (2004) Пороги снижения роста, вызванного потеплением, на высотной границе леса на территории Юкон. *Циклы Глоб Биогеохим* 18. doi:10.1029/2004GB002249
- де Луис М., Чуфар К., Саз М.А., Лонгарес Л.А., Цеглар А., Кайфеж-Богатай Л. (2014) Тенденции сезонных осадков и температуры в Словении в период 1951–2007 гг. *Reg Environ Change* 14: 1801–1810. doi:10.1007/s10113-012-0365-7
- Eilmann B, Weber P, Rigling A, Eckstein D (2006) Реакции роста *Pinus sylvestris* L. и *Quercus pubescens* Willd. на годы засухи на ксерическом участке в Вале, Швейцария. *Dendro-chronologia* 23:121–132. doi:10.1016/j.dendro.2005.10.002
- Гарамсеги Б., Керн З. (2014) Влияние климата на радиальный рост *Fagus sylvatica*, растущего вблизи границы своего распространения в горах Бюкк, Венгрия. *Дендробиология* 72: 89–97. doi:10.12657/денбио.072.008
- Гуляс К., Бидло А., Хорват А. (2014) Причины гибели лесов в сосновом лесу (*Pinus sylvestris*) в Феньёфе. В: Полгар А., Баззо Т., Надь Г., Галос Б. (ред.) Местные и региональные проблемы адаптации к изменению климата и «зеленых» технологий. Слушания. Шопрон, Венгрия, стр. 60–67.
- Харрис И., Джонс П.Д. (2015) CRU TS3.23: версия 3.23 временного ряда (TS) климатического исследовательского подразделения (CRU) с сеткой данных высокого разрешения о помесечных изменениях климата (январь 1901 г. – декабрь 1901 г.). (2014). Центр анализа данных об окружающей среде, 9 ноября 2015 г. doi:10.5285/4c7fdaf6-f176-4c58-acee-683d5e9d2ed5.
- Холмс Р.Л. (1983) Компьютерный контроль качества при датировании и измерениях колец деревьев. *Tree-Ring Bulletin* 43:69–78

- Jacoby GC, D'Arrigo R (1995) Ширина и плотность годичных колец деревьев, свидетельствующие о климатических и потенциальных изменениях лесов на Аляске. *Glob Biogeochem Cycles* 9:227–234. doi:10.1029/95GB00321
- Керн Э., Гринейс А., Моргош А. (2009) Реконструкция осадков для южных гор Баконь (Задунайский край, Венгрия) до 1746 г. н. э. на основе ширины колец дубов. *Időjárás* 113: 299–314.
- Керн Э., Патко М., Казмер М., Фекете Дж., Келе С., Палий З. (2013) Многочисленные прокси древесных колец (ширина ранней древесины, ширина поздней древесины и $\delta^{13}C$) дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), Венгрия. *Quatern Int* 239: 257–267. doi:10.1016/j.quaint.2012.05.037
- Копровски М (2012) Долгосрочное повышение температуры в марте не оказывает отрицательного влияния на годичные кольца лиственницы европейской (*Larix decidua*) в низинной Польше. *Trees Struct Funct* 26:1895–1903. doi:10.1007/s00468-012-0758-8
- Копровски М (2013) Пространственное распределение интродуцированной ели норвежской в низинной Польше: влияние меняющегося климата и экстремальных погодных явлений. *Quatern Int* 283:139–146 doi:10.1016/j.quaint.2012.04.020
- Лютербахер Дж., Дитрих Д., Ксоплаки Э., Грожан М., Ваннер Х. (2004) Европейские сезонные и годовые колебания температуры, тенденции и экстремальные значения с 1500 года. *Science* 330:1499–1503. doi:10.1126/наука.1093877
- Менцель А., Фабиан П. (1999) Вегетационный период в Европе увеличился. *Природа* 397:659. doi: 10.1038/17709
- Michélot A, Bréda N, Damesin C, Dufrene E (2012) Различная реакция роста на климатические изменения и дефицит почвенной влаги у *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* и *Pinus sylvestris* в умеренном лесу. *Для Ecol Manag* 265: 161–171. doi:10.1016/j.foreco.2011.10.024
- Миси Д., Нафради К. (2016a) Возможность идентификации негативных экстремальных климатических событий с использованием годичных колец *Pinus sylvestris* в Задунайском крае, Венгрия. *Дендробиология* 75:45–54. doi:10.12657/денбио.075.005
- Миси Д., Нафради К. (2016b) Температурные условия конца зимы — начала весны и их долгосрочное влияние на рост годичных колец деревьев в Венгрии. *Балтийский Для* 22(2):203–211
- Mérian P, Pierrat JC, Lebourgeois F (2013) Влияние выборочного усилия на статистику региональной хронологии и оценку взаимосвязей между климатом и ростом. *Dendrochronologia* 31:58–67 doi:10.1016/j.дендро.2012.07.001
- Инвентаризация лесов Управления лесного хозяйства NFCSO за 2010–2014 гг. <http://por-tal.nebih.gov.hu/documents/531011/531862/2001101001000.pdf/c9a01ba7-184a-4a76-9400-59387aee2df8>
- Нафради К., Якаб Г., Шумеги П., Селепшеньи Э., Торёчик Т. (2013) Будущие климатические воздействия на лесные массивы и лесостепи на основе Голоценовые палеоклиматические тенденции, палеоботанические изменения в центральной части Карпатского бассейна (Венгрия). *Am J Plant Sci* 4:1187–1203. doi:10.4236/ajps.2013.46147
- Панайотов М., Зафров Н., Керубини П. (2013) Следы экстремальных климатических событий в кольцах деревьев *Pinus sylvestris* из Болгарии. *Trees Struct Funct* 27: 211–227. doi:10.1007/s00468-012-0789-1
- Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (2007) IPCC, 2007: Изменение климата 2007: Воздействия, адаптация и уязвимость. Вклад Рабочей группы II в Четвертый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Cambridge University Press, Кембридж
- Поляншек Ю., Цеглар А., Леванич Т. (2013) Долгосрочное летнее солнце/Реконструкция стресса от влажности по ширине годичных колец деревьев из Боснии и Герцеговины. *Clim Past* 9:27–40. doi:10.5194/cp-9-27-2013
- Пэрн Х (2009) Временная история взаимосвязей между радиальным ростом сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и среднемесячными температурами. *Baltic For* 15:48–57.
- Reich PB, Oleksyn J (2008) Потепление климата приведет к снижению роста и выживаемости сосны обыкновенной, за исключением крайнего севера. *Ecol Lett* 11:588–597. doi:10.1111/j.1461-0248.2008.01172.x
- Ринн Ф (2003) TSAP-Win — анализ и представление временных рядов для дендрохронологии и связанных приложений. Справочник пользователя, Гейдельберг
- Санчес-Сальгеро Р., Камареро Х.Дж., Эвиа А., Мадригал-Гонсалес Х., Линарес Х.К., Баллестерос-Кановас Х.А., Санчес-Миранда А., Альфаро-Санчес Р., Сангуэса-Барреда Г., Гальван Х.Д., Гутьеррес Е., Дженова М., Риглинг А. (2015) Что движет ростом шотландцев сосна в континентальном средиземноморском климате: засуха, низкие температуры или то, и другое? *Agr Forest Meteorol* 206:151–162. doi: 10.1016/дж.agrformet.2015.03.004
- Ваганов Е., Хьюз М., Кирдянов А., Швайнгрубер Ф., Силкин П. (1999) Влияние выпадения и таяния снега на рост деревьев в субарктической Евразии. *Nature* 400:149–151. doi:10.1038/22087
- Wigley TML, Briffa KR, Jones PD (1984) О среднем значении коррелированных временных рядов с приложениями в дендроклиматологии и гидрометеорологии. *J Clim Appl Meteorol* 23:201–213. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2
- Wilson RJS, Luckman BH (2003) Дендроклиматическая реконструкция максимальных летних температур из участков верхней границы леса во внутренней Британской Колумбии. *Голоцен* 13:853–863. doi:10.1191/0959683603hl663rp
- Xoplaki E, Lutherbacher J, Paeth H, Dietrich D, Steiner N, Grosjean M, Wanner H (2005) Изменчивость европейской весенней и осенней температуры и смена экстремальных значений за последние полтысячелетия. *Geophys Res Lett* 32:L15713. doi:10.1029/2005GL023424