



Список и содержания доступны на сайте ScienceDirect

Дендрохронология

Домашняя страница журнала: www.elsevier.com/locate/dendro



Оригинальная статья



Микроклиматические условия влияют на рост лесов Фенноскандии

Клаудия Хартла*, Элизабет Дюхорн^а, Эрнест Отохедор Андрес Й. Кирххейер^{б,г,х},
Маури Тимонен^г, Штеффен Хольцкампер^е, Ульф Бюнтген^а, Ян Эспер^а

^а Географический факультет, Университет Иоганна Гутенберга, Майнц, Германия
^б Кафедра атмосферных и экологических наук, Университет Обини (SUNY), Обини, Нью-Йорк, США
^с Dendroökologen AJ Kirchhefer, Тромсё, Норвегия
^г Институт природных ресурсов Финляндии Рованими, Финляндия
^е Кафедра физико-географической географии, Стокгольмский университет, Стокгольм, Швеция
^ф Географический факультет Кембриджского университета, Великобритания
Шведский федеральный научно-исследовательский институт WSL, Бирмендорф, Швейцария
Центр исследований глобальных изменений AS CR, Брно, Чешская Республика

ИНФОРМАЦИЯ ОБ СТАТЬЕ

Ключевые слова:
Абсолютный фактор сайта
Рост бореальных лесов
Чувствительность к климату
Дендрохронология
Сосна обыкновенная
Сеть колец деревьев

АБСТРАКТ

Давняя традиция дендроклиматологических исследований в Фенноскандии подкрепляется исторической долговечностью и температурной чувствительностью деревьев, а также существованием хорошо сохранившейся субфоссильной древесины в мелководных озерах и обширных торфяных болотах. Хотя некое количество самых длинных в мире реконструкций климата на основе ширины колец и плотности были разработаны северной Фенноскандии, до сих пор неясно, имеют ли значительные различия в экологии микроклимата, и если да, то были ли они в достаточной степени учтены предыдущих исследованиях. Мы разработали сеть из 44 хронологий ширины колец сосны обыкновенной по всей Фенноскандии из 22 мест между 59°–70° с.ш. и 16°–31° в.д., что обобщает влияние влажных берегов озера и сухих внутренних микроклиматов на рост деревьев. Наша сеть выявляет сильную зависимость роста от температуры июля, которая также отражается в широте. Различия в продуктивности и леса между влажными и сухими микроклиматами, вероятно, выявлены с помощью эффекта температурных выходов в то время как деревья на влажных микроклиматах в западных местах демонстрируют более высокие температуры, а эта закономерность обратна в континентальной восточной части сети, где увеличенная ширина колец обнаруживается на более сухих участках. В дополнение к широтному увеличению чувствительности и роста к температуре июля, сосна влажных участков демонстрирует повышенную зависимость от летнего тепла. Самая высокая температурная чувствительность и согласованность роста, а следовательно, и наибольшая пригодность для реконструкций летних температур, обнаружены в тех регионах, где средние температуры июля колеблются от 11,5 до 13,5 °C, а общее количество осадков в мае не превышает 100 мм. Наше исследование не только дает рекомендации по выбору мест для проб для реконструкций климата на основе колец деревьев, но и выявляет влияние экологии микроклимата на рост лесов Фенноскандии. Проявление эффекта микросайта существенно различается в пределах Фенноскандийского бореального леса и в основном обусловлено географическим положением древостоя, что выражается в различных абсолютных факторах сайта.

1. Введение

Фенноскандия имеет давнюю традицию дендроклиматологических исследований (Linderholm et al., 2010), в рамках которой различные параметры годовичных колец использовались для реконструкций летних температур за последние столетия и тысячелетия (Büntgen et al., 2011, см. ссылки в настоящем документе). Недавние усилия включают стабильные изотопы годовичных колец для изучения изменений в продолжительности и солнечного сияния/облачности (Loader et al., 2013; Young et al., 2012), но также всего реконструируемый элемент климата - это температура летнего сезона, основанная на ширине годовичных колец или максимальной плотности поздней древесины (вспомогательная), которая сама по себе является причиной

Бюнтген и др., 2011; Эспер и др., 2012а, б; Эспер и др., 2014; Грудд, 2008 г.; Линдехольм и Гуннарссон, 2005 г.; Линдехольм и др., 2014; МакКэрролл и др., 2013).

В дополнение к долгой академической истории и хорошей доступности, есть еще по крайней мере две причины, почему климатический реконструктивный анализ на основе годовичных колец в Фенноскандии: i) надежный температурный сигнал в росте деревьев и ii) доступность образцов за последние столетия и тысячелетия. Что касается температурного сигнала, закон минимума Либиха, утверждающий, что рост зависит не от общих доступных ресурсов, а от самых редких ресурсов (ограничивающих

* Автор корреспонденции.
Адрес электронной почты: c.hartl@geo.uni-mainz.de (К. Хартл).

пригодность Фенноскандии для так их целей. Многие лесные участки и находят ся вблизи границ леса, где амбиальная активность в основном ограничена температурой вегетационного периода, сигнал, который фиксируется в ширине годичных колец. Второе требование доступности и образцов для построения длинных хронологий также дано в Фенноскандии. Хотя живые деревья охватывают только последние несколько десятилетий в этом регионе, в озерах там можно найти и больше колонок с субфоссильной древесины. Из-за анаэробных условий и

короткого периода с низкими температурами, эта субфоссильная древесина очень хорошо сохранилась на протяжении тысяч лет (Gunnarson, 2001; Helama et al., 2008) и все еще пригодна для дендрохронологического анализа. Образцы субфоссильной древесины можно перекрестно датировать с живыми деревьями для получения хронологий годичных колец длиной в тысячи лет.

Можно предположить, что субфоссильная древесина изначально росла во влажных условиях на берегу озера до того, как деревья угали в озеро. Однако для длинных хронологий живой древесный материал не обязательно отбирался на влажных берегах озера, а на «нормальных» сухих участках (Esper et al., 2012b). Как следствие, условия роста, а также ограничивающие факторы могут различаться между различными источниками древесины. Микроуровни могут не полностью отражать модели субфоссильной древесины более влажных участков. Этот вопрос эффекта микроуровня уже изучался несколькими региональными исследованиями. Некоторые исследования показали, что сигналы летней температуры были снижены на влажных микроуровнях по сравнению с более сухими участками во многих северных районах Фенноскандии (Düthorn et al., 2015, 2016; Linderholm, 2001; Linderholm et al., 2002, 2014; Matskovsky and Helama, 2014), тогда как в местах на севере Швеции все наоборот (Düthorn et al., 2013). Другое исследование Ланге и др. (2018) проанализировало потенциально разные эффекты в более крупных пространственных масштабах, от Фенноскандии до Сибири, и обнаружило, что микроуровни оказывают лишь незначительное влияние на климатические сигналы по сравнению (меняющимся) локальным климатическим режимом. Кроме того, обсуждалось, могут ли проблемы микроуровня способствовать «проблеме расхождения» (Wilmking et al., 2005), т.е. потере деревьев.

температурная чувствительность с середины 20-го века (D'Arrigo et al., 2008; Esper and Frank, 2009 для обзора). Основываясь на непосредственной чувствительности микроуровня, а также на сниженной чувствительности к климату в течение последних десятилетий, была поставлена под сомнение априорная пригодность деревьев из Фенноскандии для температурных реконструкций (Düthorn et al., 2015; Edvardsson et al., 2015; Hellmann et al., 2016; Lange et al., 2018; Linderholm et al., 2014; Wilmking et al., 2020).

Все вышеупомянутые исследования изучали микроуровневые эффекты максимум в шести местах, и результаты из этих исследований были противоречивыми. Поэтому не совсем ясно, как микроуровневые эффекты проявляются с учетом более широкой экологической амплитуды, что именно влияет на наличие и силу так их эффектов, и являются ли они возможной причиной проблемы расхождения. Для решения этих вопросов мы составили сеть из 44 микроуровневых хронологий из 22 мест, охватывающих несколько экологических градиентов по всей Фенноскандии, и проанализировали эти данные, чтобы выявить потенциально различающиеся реакции роста.

Сначала мы оцениваем (не)сходство средних хронологий микроуровней в пределах всей сети, а затем оцениваем различные температурные и климатические сигналы их стабильности с течением времени, и связываем эти результаты с различными абiotic факторами по всей сети, чтобы попытаться объяснить изменения роста и реакцию на климат средних микроуровней во времени и пространстве. Этот подход позволяет нам поместить новую сеть ширины годичных колец сосны более широкой контекст роста boreal-ных лесов Фенноскандии.

2. Материалы и методы

2.1. Сеть годичных колец

Мы разработали сеть микроуровневых ширины годичных колец деревьев в Фенноскандии, которая включает 1983 дерева сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из 22 мест от берега пролива Гибралтар с севера на юг ~1200 км и градиента с запада на восток ~700 км между 59 и 70 с.ш и 16 и 31 в.д. (рис. 1). В каждом месте мы отобрали образцы деревьев, растущих на влажных участках

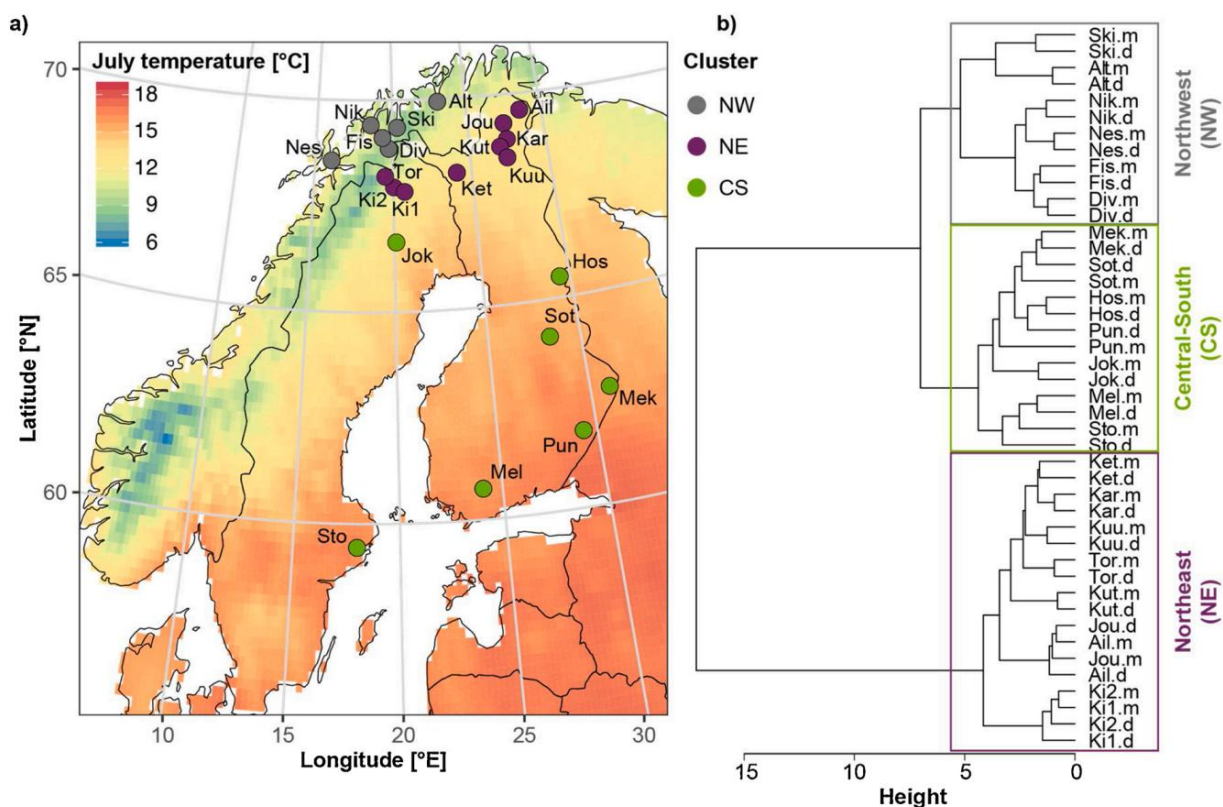


Рис. 1. а) Сеть из 44 микроуровневых ширины годичных колец деревьев по всей Фенноскандии, наложенная на средние значения температуры июля, основанные на инструментальных измерениях за период 1961–1990 гг. б) Иерархический кластерный анализ хронологий 44 микроуровневых, рассчитанных за общий период 1903–2006 гг.

непосредственно на берегу озера (данные обозначены как Хyz.m) и на локально более сухих участках в нескольких метрах от берега (Хyz.d) во время нескольких полевых кампаний между 2012 и 2016 годами. Мы собрали два керна прироста диаметром 5 мм с каждого дерева на высоте груди (~1,30 м), и на каждом микроучастке было отобрано не менее 30 здоровых на вид деревьев с гетерогенным доминированием и возрастной структурой. Этот набор данных дополняется существующими данными из пяти мест, следующих той же схеме выборки (K1, K2, Ket, Sto, Tor; [Büntgen et al., 2011](#); [Esper et al., 2012b](#); [Düthorn et al., 2013](#)) (таблица 1). В общей сложности 3965 серий ширины колец на один год позволяют разместить новые 44 хронологии микроучастков в более широкий контекст роста в borealньх лесов Фенноскандинавии. Ширина годовых колец измерялась с разрешением 0,01 мм с использованием мерительных приборов LINTAB и программного обеспечения TSAPWin (оба Rinntech, Гейдельберг, Германия). Перекрестное датирование проверялось визуальным истинным использованием программы COFECNA ([Holmes, 1983](#)).

Рис. 1 а) Сеть из 44 микроучастков ширины годовых колец деревьев по всей Фенноскандии, наложенная на средние значения температуры июля, основанные на истинном альбедо из мерениях за период 1961–1990 гг. б) Иерархический кластерный анализ хронологий 44 микроучастков, рассчитанных за общий период 1903–2006 гг.

2.2.Хронология развития

Для удаления возрастных тенденций роста мы создали безразмерные индексы ширины колец (RWI) путем индивидуального удаления тренда из сырых рядов ширины колец с использованием убывающих сплайнов с 50%-ным срезовым частотой 100 лет ([Cook и Peters, 1981](#)). Хронологии микросайтов были построены путем усреднения отдельных рядов с удаленным трендом с использованием надельного среднего ([Mosteller и Tukey, 1977](#)). Межрядовая корреляция (rbar), т. е. средний коэффициент корреляции Пирсона среди всех отдельных рядов с удаленным трендом в пределах микросайта, используется для оценки ковариации хронологий (таблица 1). Дополнительные описательные статистики и включения среднюю длину ряда (MSL), представляющую среднюю возрастную структуру деревьев в хронологии микроучастка, среднюю скорость роста необработанных данных о ширине годовых колец (AGRall), представляющую среднюю ширину годовых колец всего насаждения микроучастка, и автокорреляцию первого порядка (Lag-1) данных с включенным трендом, как показано в

2.3. Хронологическое (несходство)

Сравнения между сайтами проводились с использованием двух различных методов: для выявления различий в сетевых микросайтах был проведен иерархический кластерный анализ (HCA) с использованием метода Уорда и использованием евклидова расстояния в качестве меры расстояния. Для оценки ковариации в сетевых мы вывели коэффициент корреляции Пирсона между хронологиями микросайтов. Учитывая группировку HCA, мы вывели средние межхронологические корреляции (rbarC) для сухих (rbarCd), влажных (rbarCm) и полных (rbarCall) хронологий микросайтов. Все эти анализы проводились в течение общего периода 1903–2006 гг. хронологическое перекрестное (хотя одна хронология Kuu.m короткая; Таблица 1).

2.4 Оценка роста

Поведение роста на разных микросайтах описывалось с помощью AGRall, рассчитанного по общему возрасту дерева. Мы дополнили наш расчетный рост за первые 40 лет возраста дерева (AGRC40), чтобы смягчить влияние возраста дерева на AGRall. На основе этого мы рассчитали различия в сухих и влажных микросайтах ΔAGRC40 = AGRC40.d - AGRC40.m в каждом месте и по всей сети. Для оценки потенциальной зависимости AGR и ΔAGR от абиотических факторов, включая широту, высоту, температуру июля и осадки в мае (E-OBS v19.0, [Cornes et al., 2018](#)), мы использовали обобщенные аддитивные модели (GAM) со шрифтом сплайном регрессии тонкой пластичности в качестве основы сплайна для каждого фактора отдельно ([Wood, 2017](#)).

Таблица 1

Сайт	Классиф.	Широта	Длина	Высота	Период	MSL	AGRall	Влажный	Сухой	Рост	Влажный	Сухой	Влажный	Сухой	Число
Алп	CB	69.52	28.57	120	1733-2011	872	0.89	0.89	0.32	0.32	0.65	0.65	0.65	0.65	110
		69.92	23.11	73	1812-2015	438	0.84	0.84	0.3	0.3	0.76	0.69	93	73	
Баль-Т	CB	68.86	19.59	320	1817-2013	66	0.94	0.94	0.23	0.25	0.66	0.66	105	77	
		69.06	29.44	259	2004	89	0.89	0.89	0.29	0.29	0.83	0.75	701	69	
Хос	КС	66.65	20.11	302	1750-2013	300	0.82	0.82	0.41	0.27	0.6	0.66	126	86	
Алек	КС	69.26	27.4	200	1708-2011	96	0.92	0.92	0.31	0.27	0.74	0.63	170	144	
Джу	CB	68.83	27.31	258	1708-2011	82	0.88	0.88	0.28	0.35	0.68	0.73	74	126	
Кар	CB	68.22	24.05	300	1749-2006	83	0.81	0.81	0.27	0.38	0.73	0.78	66	49	
Кет	CB	67.9	20.1	451	1826-2009	30	0.84	0.84	0.39	0.38	0.79	0.69	60	68	
К-И	CB	67.95	20.03	430	1781-2006	86	0.72	0.72	0.35	0.37	0.7	0.61	104	87	
К-2	CB	68.77	27.15	170	1772-2015	544	0.89	0.89	0.48	0.43	0.85	0.81	80	73	
Кут	CB	68.45	27.36	302	1856-2011	89	0.89	0.89	0.18	0.28	0.61	0.62	87	88	
Ку	КС	62.73	31.01	147	1903-2011	89	0.89	0.89	0.23	0.26	0.74	0.71	125	88	
		60.73	24.06	120	1899-2011	89	0.82	0.82	0.29	0.28	0.63	0.68	116	93	
Ман	КС	68.57	16.06	345	1759-2013	96	0.89	0.89	0.23	0.22	0.53	0.52	71	93	
		69.36	18.73	90	1845-2014	86	0.87	0.87	0.34	0.29	0.67	0.72	69	63	
НКС	КС	61.81	29.31	78	1838-2011	401	0.87	0.87	0.37	0.43	0.81	0.75	102	84	
		69.35	20.32	72	1823-2013	94	0.87	0.87	0.29	0.22	0.7	0.8	104	98	
Джу	КС	64.12	28.34	148	1881-2011	95	0.82	0.82	0.26	0.16	0.77	0.64	93	98	
		59.44	17.99	20	1854-2009	93	0.80	0.80	0.38	0.26	0.57	0.67	58	69	
Сго	КС	68.2	19.8	390	1810-2006	89	0.80	0.80	0.35	0.27	0.67	0.6	97	79	

2.5 Климатические сигналы

Анализ реакции и роста/климата были выполнены с использованием хронологий микросайтов с исключенными трендами и среднемесячными суммами температур и осадков. Климатические данные, репрезентативные для каждого сайта, были получены из набора данных с сеткой E-OBS v19.0 (сетка 0,25° × 0,25°, Cornes et al., 2018). Бутстрепинговые корреляции для данных о климате за июнь предыдущего года и сентябрь текущего года были рассчитаны за общий период 1950–2006 годов. Чтобы определить, какой микросайт имеет более высокий климатический сигнал в каждом месте, мы вычислили разницу между корреляциями сухих микросайтов и корреляциями влажных микросайтов ($\Delta r = r_{dry} - r_{moist}$).

Зависимость сигналов температуры июля, присущих хронологиям, от абiotических факторов была снова проверена с помощью GAM. Изменения сигналов температуры с течением времени были исследованы с использованием 25-летних скользящих корреляций и подхода с разделенным периодом в течение периодов 1950–1978 и 1979–2006 годов. Для анализа факторных различий изменения температуры от климата с течением времени мы рассчитали $\Delta r = r_{1950-1978} - r_{1979-2006}$. Все

Статистические процедуры выполнялись с использованием R 3.5.3 (R Core Team, 2019) и пакетов dplR (Bunn et al., 2012), mgcv (Wood, 2017) и treedlim (Zang and Biondi, 2015).

3. Результаты

3.1 Сетевые характеристики и хронологические (несходства)

Фенноскандинавский микросайтовый сетевой можно разделить на три части: Основные группы по признаку HCA: северо-западная Норвегия (C3), северо-восточная Фенноскандия (CB) и центральная Фенноскандия (ЦФ) (рис. 1). Кластер NW включает шесть местоположений из прибрежных регионов в районе Скандинавских островов. Кластер NE включает девять местоположений с подветренной стороны Скандинавских островов, в Швеции и Финляндии, все к северу от полярного круга. Остальные семь местоположений кластера CS, за исключением одного местоположения (Йок), все расположены к югу от полярного круга. Внутренний кластер хронологий микросайтов из одного местоположения не обязательно не статистически

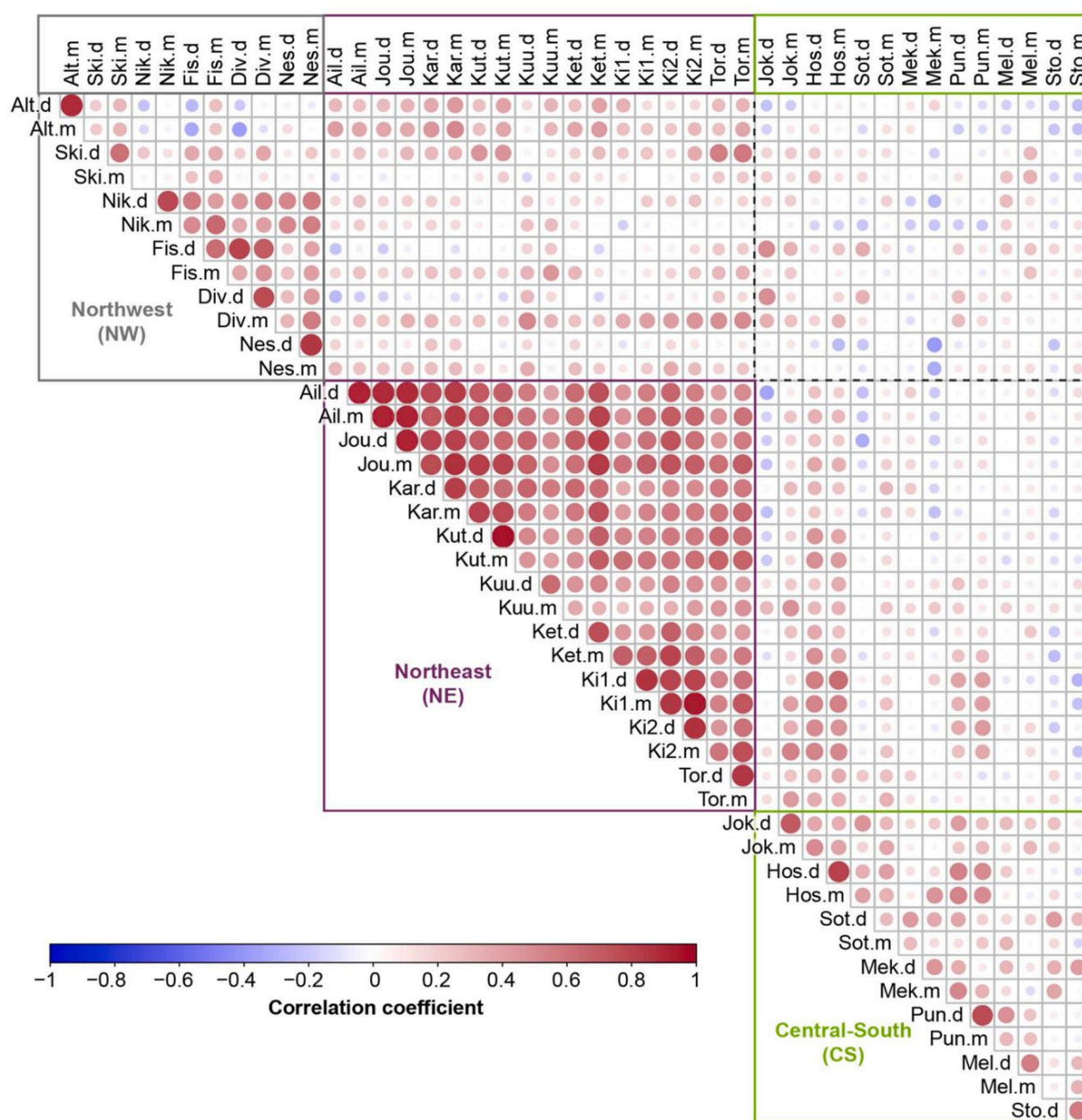


Рис. 2. Коэффициент корреляции Пирсона (представленные цветом и размером круга) между всеми 44 хронологиями микророста Фенноскандии, рассчитанными за общий период 1903–2006 гг. (хотя у Kuu.m и Tor.m).

ближе друг к другу, чем к хронологии микросайта из другого местоположения (рис. 1b), за исключением кластера NW, где наибольшее сходство зафиксировано между влажной и сухой хронологией одного местоположения. Напротив, в кластере NE, например, Ki1.m и Ki2.m более похожи по сравнению с их сухим аналогом. Однако, различие связанных хронологий микросайтов в одном местоположении, как правило, невелико, как можно видеть из рис. 1b.

Матрица корреляции (рис. 2) подчеркивает и уточняет результаты HCA, хотя она также показывает общепоследовательность изменений и от года к году при рассмотрении всей сети. Например, самые северные хронологии из Alt антикоррелированы с самыми южными хронологиями из Sto ($r = -0,2$).

Рис. 2 Коэффициент корреляции Пирсона (представленные цветом и размером круга) между всеми 44 хронологиями микросайтов Фенноскандии, рассчитанными за общий период 1903–2006 гг. (хотя у Kuu.m коротче).

Самые высокие ковариации обнаружены среди хронологий кластера NE, поскольку коэффициент корреляции $r = 0,4$ с учетом всех хронологий. Только хронологии из Куу покажут более низкую корреляцию (минимум $r = 0,25$) с другими хронологиями из этого кластера. В кластере NW картина совершенно иная, поскольку существует больший диапазон между тесно коррелированными и даже антикоррелированными хронологиями (например, Alt на северном побережье с r до $-0,37$ с внутренними хронологиями Fis и Div). В кластере CS мы не находим последовательной ковариации между хронологиями с широким диапазоном значений r .

Корреляция между влажной и сухой климатом обычно выше в северо-восточном кластере и колеблется от $r = 0,76$ (Ket) до $0,95$ (Kut) и ниже только для Куу ($r = 0,63$), но это может быть связано с более коротким периодом, который рассматривается, поскольку у Куу.м восходит только к 1931 году. При значениях r между $0,62$ и $0,88$ корреляция внутри местоположения также высока в кластере NW. Самые низкие коэффициенты корреляции между хронологиями от влажного к сухому обнаружены в кластере CS и варьируются от $0,29$ (Sto) до $0,8$ (Hos).

При построении всех хронологий в соответствии с их соответствующим кластером (рис. 3) вышеупомянутые результаты явно подтверждаются визуально. Хронологии в пределах NE кластера имеют очень высокую синхронность, что также отражено в высоких значениях r_{barC} , хотя ковариация является самой высокой при объединении всех сухих ($r_{\text{barCd}} = 0,76$) хронологий. Она по-прежнему высока в пределах влажных ($r_{\text{barCm}} = 0,73$) или при рассмотрении всех хронологий

($r_{\text{barCall}} = 0,75$), но ковариация кластерного среднего сухой и влажной хронологии с $r_{\text{m/d}} = 0,97$ чрезвычайно высока. В кластере NW ковариация визуально кажется относительно высокой, только хронологии Alt выделяются в 1940-х годах из-за искусственного дымового загрязнения во время Второй мировой войны (Hartl et al., 2019). Однако значения r_{barC} намного ниже по сравнению с кластером NE, а самая высокая ковариация обнаружена во влажных хронологиях ($r_{\text{barCd}} = 0,27$, $r_{\text{barCm}} = 0,36$, $r_{\text{barCall}} = 0,35$). Средние значения кластера влажной и сухой коррелируют только с $r_{\text{m/d}} = 0,84$. Кластер CS также визуально кажется шумным, а значения r_{barC} даже ниже, чем в кластере NW, но здесь самая высокая ковариация обнаружена среди сухих хронологий ($r_{\text{barCd}} = 0,32$, $r_{\text{barCm}} = 0,25$, $r_{\text{barCall}} = 0,31$, $r_{\text{m/d}} = 0,81$).

Рис. 3 Все 44 хронологии микросайтов, нанесенные на график в пределах соответствующего кластера. Полупрозрачные красные/синие цвета представляют отдельные сухие/влажные хронологии микросайтов в кластере NW (верхняя панель), кластере NE (средняя панель) и кластере CS (нижняя панель), а жирные линии указывают соответствующие средние значения кластера. Хронологии были усечены при минимальной репликации пяти серий, а значения r_{bar} отнесены к общему периоду 1903–2006 гг.

3.2. Поведение роста

Зависимость характеристик роста от абiotических факторов анализировалась с помощью AGRall всего периода, т.е. среднего роста всего насаждения (рис. 4a), а также роста на уровне насаждения в течение амбиальных возрастов от 1–41 (AGRC40) (рис. 4b и c), но только ограниченный объем факторов значения не объясняют дисперсию эмпирического роста. AGRall сильно зависит от MSL, при этом GAM объясняет 34% дисперсии, и нет никакой разницы во влажных или сухих микросайтах, а также форма моделей очень похожа (рис. 4a). Широта, по-видимому, является важным фактором, особенно в кластере CS, тогда как долгота и высота не важны для различий в AGRall. Напротив, июльские температуры значительного запуска AGRall, но это также рис. 4 Температурная функция средней длины года (MSL) и различных факторов абiotических сайтов. а) Средний темп прироста (AGRall), представляющий среднюю ширину годовичных колец всего насаждения, б) AGRC40 представляет средний прирост за первые 40 лет жизни дерева и c) разницы сухого и влажного микроучастка AGRC40 ($\Delta\text{AGRC40} = \text{AGRC40.d} - \text{AGRC40.m}$).

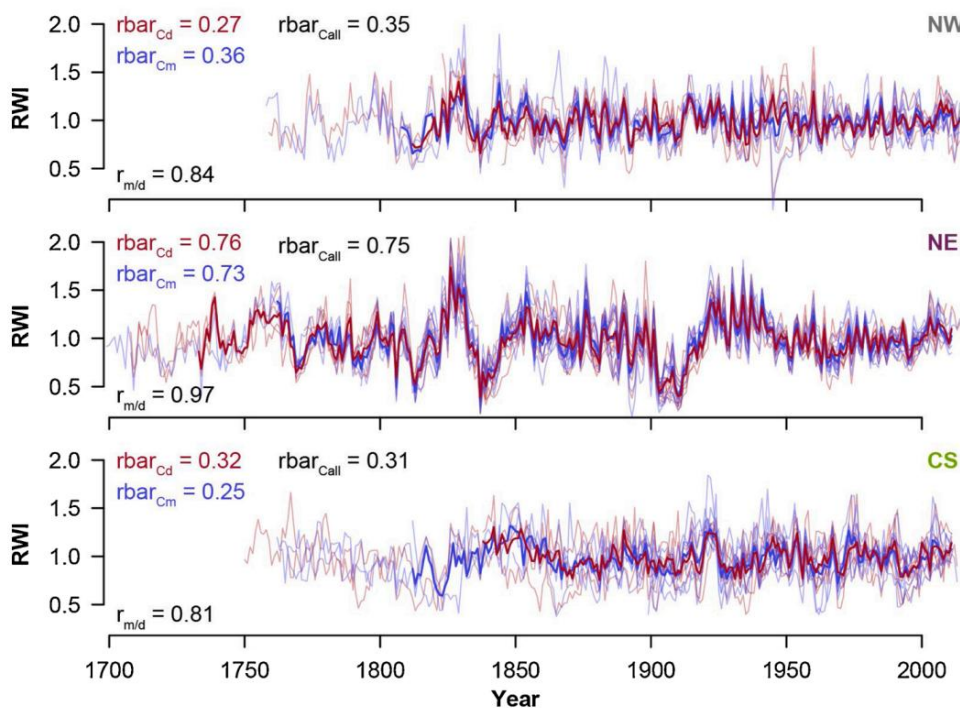


Рис. 3. Все 44 хронологии микросайтов, нанесенные на график в пределах соответствующего кластера. Полупрозрачные красные/синие цвета представляют отдельные сухие/влажные хронологии микросайтов в кластере NW (верхняя панель), кластере NE (средняя панель) и кластере CS (нижняя панель), а жирные линии указывают соответствующие средние значения кластера. Хронологии были усечены при минимальной репликации пяти серий, а значения r_{bar} отнесены к общему периоду 1903–2006 гг. (Для интерпретации ссылки на цвета в этой легенде рисунка читатель отсылается к веб-версии этой статьи).

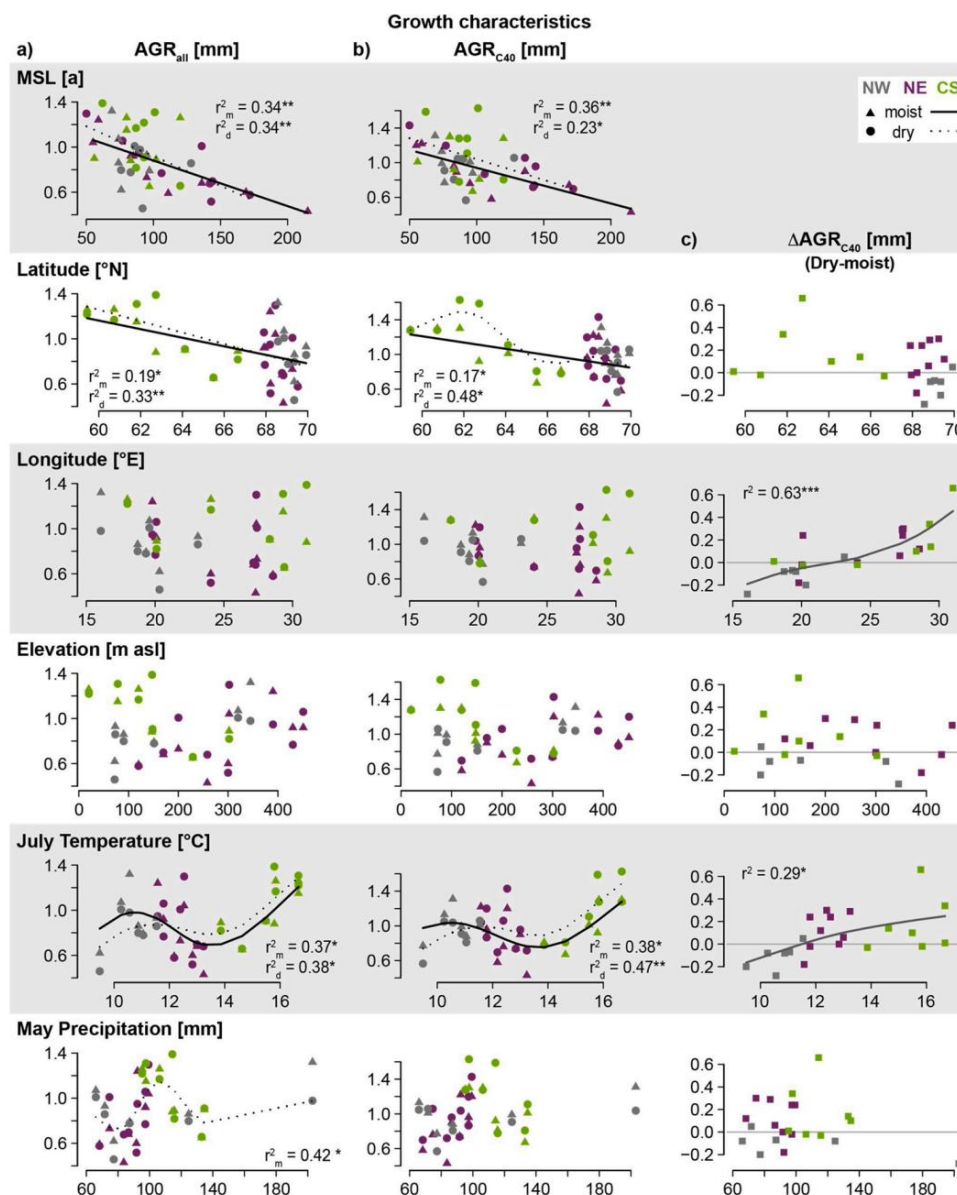


Рис. 4. Температурная функция средней длины года (MSL) и различных абiotic факторов участка. а) Средний темп роста (AGR_{all}), представляющий среднюю ширину колец всего насаждения, б) AGR_{c40} представляет средний прирост за первые 40 лет возраста дерева, и в) разность сухого и влажного микроучастка AGR_{c40} (ΔAGR_{c40} = AGR_{c40,d} - AGR_{c40,m}).

показывает распределение сет и микросайтов вдоль температурного градиента. В кластере NW деревья достигают более высоких темпов роста с ростом температуры. Эта картина отличается от кластера NE, где мы фактически можем видеть тенденцию к снижению темпов роста с ростом температуры. В кластере CS более высокие темпы роста снова обнаруживаются на участках с более высокими температурами. GAM объясняет 37% (38%) дисперсии для влажных (сухих) микросайтов, а также форма моделей похожа, хотя наклоны ручей для влажных микросайтов. Для осадков в мае существуют различия между кластерами с увеличением осадков в мае деревья растут быстрее в кластере NE, тогда как эта тенденция инвертируется для кластера CS. В кластере NW AGR_{all} кажется независимым от сумм осадков. GAM только частично объясняет дисперсию AGR_{all} для влажных микросайтов (42%).

Мы рассматривали AGR_{c40} для амбиального возраста 1–41 год для наших анализов (рис. 4b), поскольку мы обнаружили наиболее выраженные различия во влажных и сухих участках для этого возраста деревьев для всех местоположений (см. рис. S1). Даже несмотря на то, что AGR_{c40}, выровненный по возрасту, должен быть менее чувствителен к MSL, т.е. возрасту деревьев, 23% (36%) дисперсии можно объяснить MSL для сухих (влажных)

участков. В целом, мы находим те же зависимости и/или независимости всех абiotic факторов, что и для AGR_{all}, как описано выше, хотя объясненная дисперсия GAM немного варьируется (см. рис. 4a и 4b). Однако для анализа различий между поведением роста сухих и влажных микроучастков (ΔAGR_{c40}) более надёжно сосредоточиться на AGR_{c40}, выровненных по возрасту к амбию (рис. 4c). В целом, мы находим в одинаковых местах более высокие темпы роста на сухом микроучастке, в пяти местах почти нет разницы, а в шести местах влажные микроучастки имеют более высокий рост с возрастом к амбию до 41 года. Широта, высота и осадки в мае оказывают незначительное влияние на объяснение различий в росте между микроучастками.

Напротив, долгота объясняет 63% дисперсии, при этом местоположения на Западе имеют более высокие темпы роста на влажных микроучастках, а местоположения на Востоке имеют более высокие темпы роста на сухих микроучастках, независимо от кластера. Температура июля раскрывается как важный фактор. В местах с температурой ниже 11,5 °C, что является значительной степенью, представляет кластер NW, мы обнаруживаем более высокие темпы роста на влажном микроучастке (за исключением одного местоположения). Выше этой температуры для кластеров NE и CS мы скорее обнаруживаем более высокие темпы роста на

сухие микроростки и. GAM объясняет 29% этой модели. Нанесение этих результатов в пространстве (рис. 5а) подчеркивает, что в прибрежных и западных местах влажные микроростки имеют более высокие температуры по сравнению с остальными более теплыми местами, где сухие микроростки и похолодание более высокие температуры.

Рис. 5 Пространственная картина различий между сухими и влажными микроростками. а) Разница в средней скорости роста в ювенильной фазе (возраст камбия 1–41, сухой – влажный), красные цвета указывают на более высокие скорости роста на сухом микроростке, серые цвета указывают на почти отсутствующие различия, а синие цвета указывают на более высокие скорости роста на влажном микроростке. б) Различия в реакциях температуры июля (сухой – влажный), красные цвета указывают на более высокие температурные сигналы на сухом микроростке, серые цвета указывают на почти отсутствующие различия, а синие цвета указывают на более высокие температурные сигналы на влажном микроростке.

3.3. Реакция на изменение климата

Ежемесячные модели роста/реакции на климат выявляют различную чувствительность к климату отдельных мест (рис. S2). Однако средние значения июля являются наиболее частыми месяцами, показывающими значимые корреляции для температуры (31 из 44 случаев), а май — для осадков (15 случаев). Поскольку температура более важна для роста деревьев в Фенноскандии, мы сосредоточимся на моделях реакции на температуру в дальнейших анализах.

В целом, сигнал температуры июля варьируется среди микроростков, и эту изменчивость можно объяснить абiotическими факторами. Построение графика зависимости реакции температуры от абiotических факторов показывает, что сигнал не увеличивается линейно с широтой (рис. 6а). Корреляция увеличивается с широтой, достигая самых высоких значений на ~68°N, но GAM указывает на ослабление сигнала дальше на север, что наиболее выражено на влажных микроростках. Долготы не оказывают существенного влияния при рассмотрении всей сети, хотя этот фактор, по-видимому, важен в кластере CS, показывающем увеличение

корреляции с увеличением долготы. Для влажных микроростков высота, по-видимому, объясняет не только дисперсию коэффициентов корреляции, но и наклон модели довольно пологий, и этот фактор кажется менее важным в пределах северо-восточного кластера. Абсолютная температура июля является наиболее значимым фактором для температурного сигнала июля, присущего ширине годичных колец. Однако, по широте, эта связь не линейна, а наиболее сильна в температурном диапазоне северо-восточного кластера (~12°C до 13,5°C, см. фиолетовые цвета на рис. 6а). Наконец, нет значимой связи между осадками мая и температурными колебаниями июля, хотя мы обнаруживаем самые сильные температурные сигналы при суммах осадков в мае < 100 мм, по крайней мере, в северо-восточных и северо-западных кластерах.

Что касается различий в реакции между влажными и сухими микроростками (рис. 5b и 6b), единственной поразительной особенностью является более сильный сигнал температуры июля на влажном микроростке для 18 местоположений. Только в 4 местах сухой микроросток показывает более высокие реакции, хотя и без какой-либо зависимости от региона/кластера. Ни один из абiotических факторов не может объяснить эти различия, и, по-видимому, нет никакой систематической закономерности среди кластеров.

Текущие (рис. S3) и разделенные на периоды корреляции (1950–1978 и 1979–2006) показывают частое снижение силы сигнала (что выражается положительными значениями Δr ; рис. 6с) на влажных микроростках по сравнению с сухими сайтами. Однако у сухих микроростков только пять влажных микроростков показывают более высокие температурные чувствительности в более поздний период (т.е. отрицательные значения Δr). Таким образом, пять сухих (рис. 6) июльские модели температуры от климата и микроростков как функция различных абiotических факторов. Коэффициент корреляции хронологий микроростков с температурой июля за период 1950–2006 гг. Заполненные символы указывают на значимые корреляции при $p < 0,05$. б) Разница в коэффициенте корреляции от климата температуры июля между сухими и влажными микроростками ($\Delta r = r_{dry} - r_{moist}$), как показано на а). в) Изменение от климата температуры июля с течением времени на каждом микроростке ($\Delta r = r_{1950-1978} - r_{1979-2006}$).

микроростки и три влажных микроростка показывают существенное увеличение ($\Delta r < -0,16$), тогда как три сухих микроростка и пять влажных микроростков

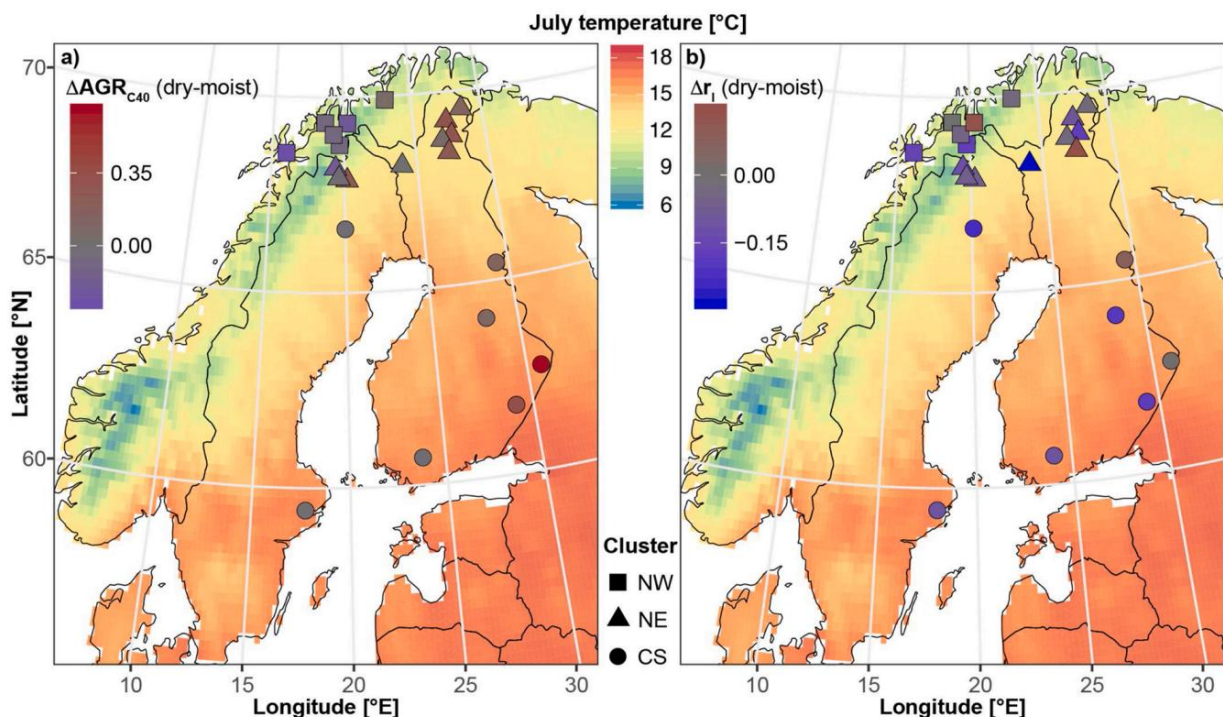


Рис. 5. Пространственная картина различий между сухими и влажными микроростками. а) Разница в средней скорости роста в ювенильной фазе (возраст камбия 1–41, сухой – влажный), где красные цвета указывают на более высокие скорости роста на сухом микроростке, серые цвета указывают на почти отсутствующие различия, а синие цвета указывают на более высокие скорости роста на влажном микроростке. б) Различия в реакциях температуры июля (сухой – влажный), где красные цвета указывают на более высокие температурные сигналы на сухом микроростке, серые цвета указывают на почти отсутствующие различия, а синие цвета указывают на более высокие температурные сигналы на влажном микроростке. Для интерпретации ссылки на цвета в этой подписи рисунка и отсылается к веб-версии этой статьи.

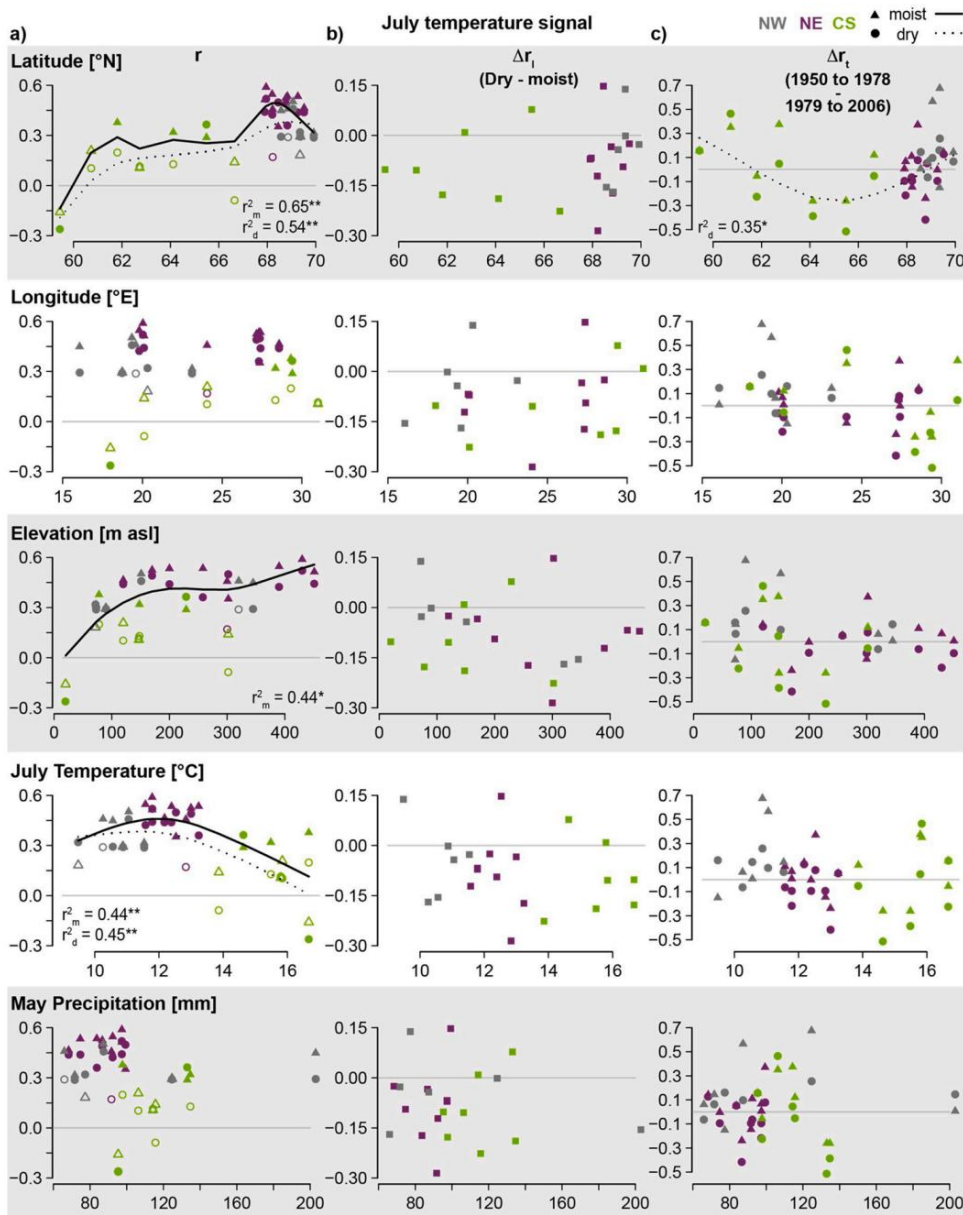


Рис. 6. Модели реакции температуры июля и мая на микросайты как функция различных абiotических факторов сайта. а) Коэффициент корреляции хронологий микросайтов с температурой июля за период 1950-2006 гг. Заполненные символы указывают на значимые корреляции при $p < 0,05$. б) Разница коэффициента корреляции температуры от климата июля между сухим и влажным микрорасклом ($\Delta r_t = r_{dry} - r_{moist}$), как показано на а). в) Изменение температуры от климата июля с течением времени на каждом микрорасклом ($\Delta r_t = r_{1950-1978} - r_{1979-2006}$).

показывают существенное снижение ($\Delta r_t > 0,16$) температуры июля восточных и западных регионов. Такое распределение усиления или ослабления сигнала не может быть достоверно объяснено ни одним из проанализированных абiotических факторов, за исключением сухого климата и широты.

4. Обсуждение

Все еще существуют неопределенности и отнесение к микросайтам эффектов в дендроклиматологии (Düthorn et al., 2013, 2015, 2016; Lange et al., 2018; Linderholm, 2001; Linderholm et al., 2002, 2014; Matskovsky and Helama, 2014). Тем не менее, никаких общих выводов сделать не удалось, поскольку было проанализировано лишь ограниченное количество участков. Здесь мы попытаемся решить эту проблему по всей Фенноскандии и проанализировали 22 места, охватывающие широкий спектр географических градиентов.

4.1 Характеристика и сетка географического региона преобладает над различиями микросайтов

Кластерный анализ делил хронологию 44 микросайтов на три

группы. Таким образом, географический регион, по-видимому, преобладает над различиями микросайтов, поскольку в большинстве случаев соответствующие микросайты истинно и ближе друг к другу, чем к другим местоположениям (рис. 1). Это подкрепляется высокими коэффициентами корреляции, которые не отступают от 0,63 в кластерах NW и NE и 0,55 в кластере CS, за исключением двух местоположений (Sot и Mek) (рис. 2). Высокие коэффициенты корреляции и синхронность среди всех хронологий в кластерах NE (см. рис. 2 и 3) предполагают, что рост деревьев контролируется исключительными и трансрегиональными ограничивающими факторами в этих местоположениях, даже несмотря на то, что между некоторыми местоположениями существует максимальное расстояние в 440 км (Тог на западе и Айл на востоке). В кластерах CS и NW, по-видимому, ограничивающие факторы среди местоположений различаются, что приводит к более низким коэффициентам корреляции, а также к более низким значениям градиента хронологий. Это не совсем очевидно, так как местоположения в кластере CS распределены еще больше по региону, превышающему 800 км между удаленными местоположениями. Различия в факторах местоположения на этих расстояниях сильнее, например, продолжительность дня или освещенность в этих широтах. Все местоположения кластера NW расположены в ландшафте фьорда, что указывает на то, что рельеф сильно влияет на микроклиматические условия.

4.2 Факторы контролирующие рост бореальных лесов в трансрегиональном микрорайоне

Оценки темпов роста по азала, что объемная амбиальная активность в основном контролируется широтой и температурой в Фенноскандии, независимо от микросайта (рис. 4). Средняя ширина колец уменьшается с увеличением широты поскольку границы леса сдвигаются ближе (Harti-Meier et al., 2014; Korner, 2012; Paulsen et al., 2000). Однако зависимость темпов роста от температуры и колеблется между кластерами. В то время как более высокие температуры приводят к более высоким темпам роста в кластерах NW и CS, этот эффект обратный в кластере NE. Это может быть связано с доступностью воды поскольку мы также обнаружили зависимость темпов роста от майских осадков в кластере NE, что указывает на то, что деревья могут выигрывать от более высоких температур только в том случае, если весной также достаточно воды.

Различия в скорости роста между влажными и сухими микрорайонами связаны с долготой и июльскими температурами (рис. 4с и 5а). В исследуемом регионе эти факторы контролируют Северо-Атлантический индекс (продолжением Гольфстрима в Северной Европе), который уменьшает с запада на восток и сильно влияет на температурные условия во все сезоны. В целом, мы обнаружили, что в кластере NW деревья из влажного микрорайона растут быстрее, тогда как в кластерах NE и CS деревья из сухих микрорайонов по азали более высокие темпы роста. В прибрежном западном регионе (и Iuv Скандинавских островов) зимние и весенние температуры намного мягче по сравнению с восточным более континентальным регионом (под ветренными Скандинавскими островами), что приводит к меньшему заморозку почвы. Если почва не замерзла, деревья имеют немедленный доступ к воде в начале вегетационного периода, что, вероятно, особенно полезно для деревьев из влажных микрорайонов по сравнению с сухими микрорайонами. В восточной области, т.е. в кластерах CS и NE, почвенный заморозок может сохраняться дольше в начале вегетационного периода, так что нет преимуществ влажной доступности воды на этих участках. Напротив, почвы восточнее на сухих микрорайонах, так что рост деревьев может начинаться раньше в году, и, следовательно, вегетационный период становится длиннее.

4.3 Влияние микросайт-специфических темпов роста на развитие хронологии и климатических сигналы

Помимо экологического объяснения, различия в скорости роста в первую очередь имеют отношение к дендроклиматологическим исследованиям, т.е. когда выводятся температурные реконструкции. Для создания температурной реконструкции на основе годовых колец, включая низкую частоту от нулевой экспериментально необходимо применить региональную стандартную азимутальную (RCS) (Esper et al., 2003).

Таким образом, ряды годовых колец выравниваются по амбиальному возрасту, а специфические для участка средние рост всех выровненных по возрасту рядов (так называемая региональная ривая) выносятся из единственного ряда до того, как они будут датированы календарными годами. Это означает, что темпы роста имеют решающее значение и контролируют уровень индекса ряда после удаления тренда. Если региональная ривая из живых деревьев «неправильного» микросайта будет объединена с субфоссиальным материалом из озера, это приведет к неправильному удалению тренда и смещенным оценкам температур (см. также Düthorn et al., 2013, 2015).

В том же дендроклиматологическом контексте микросайтовые различия климатических сигналов так же важны поскольку модели роста климата от живых деревьев переносятся на субфоссиальный материал. Мест произрастания деревьев, упавших в озера, весьма вероятно, является влажным микросайтом, и это привело бы к неправильной реконструкции климата, если бы была применена модель роста климата от более сухого места. Кроме того, мы обнаружили в нашей сети микросайтов, что за исключением четырех мест, температурные сигналы всегда выше на влажном микросайте (рис. 6).

Однако различия в температурном сигнале июля не контролируются как илюбо анализируемым абiotическим фактором, и мы можем вывести из здесь, никак ой протрансвенной закономерности, в отличие от темпов роста, как объяснено выше (рис. 5). Можно было бы ожидать, что деревья на более влажных участках содержат более сильные температурные сигналы поскольку они не испытывают никаких ограничений водного стресса и могут в полной мере извлекать выгоду из более высоких летних температур. Однако, что касается стабильности климатического сигнала с течением времени, мы также обнаруживаем снижение сигнала на влажных микрорайонах по сравнению с сухим аналогом.

Потеря сигнала, как правило, довольно мала и существенно только в восьми хронологиях (три сухих и пять влажных), и они скорее расположены менее чувствительным к температурным кластерам NW и CS, т.е. регионах, где реконструкция климата в любом случае не будет выполнена. Это означает, что мы не видим доказательств для последовательного или зависящего от микросайта явления дивергенции, которое также сообщает Бюнген и др. (2011).

4.4. Значение для температурных реконструкций на основе годовых колец в Фенноскандии

Помимо различий в микросайтах на основе нашего сетевого анализа мы можем дать четкую рекомендацию по выбору мест для дендроклиматических исследований, направленных на реконструкцию реконструкций или летней температуры. Кластер NE определен для беспрепятственной реконструкции температур поскольку мы находим значительные сигналы температурных во всех хронологиях (кроме Ket.d), коэффициент корреляции высок и в значительной степени независимы от других абiotических факторов, включая долготу или высоту. Мы обнаружили самые высокие климатические сигналы в регионах с температурами июля 11,5–13,5 °C и осадками в мае <100 мм (обратите внимание, что это относит к среднему значению за 1961–1990 гг.). В этом кластере NE влажные хронологии микросайтов всегда показывают более высокие значения климата, что идеально подходит для объединения данных о живых деревьях с субфоссиальным материалом для достижения хронологий и реконструкций длиной в тысячу лет, как описано выше.

Что касается стабильности климатического сигнала с течением времени, у нас либо нет +/- изменений, либо на больший масштаб роста даже наблюдается увеличение сигнала. Только на одном участке (Куу) хронология сухого микрорайона имеет более высокий сигнал температуры июля, и это место является единственным в этом кластере, где мы обнаруживаем существенное уменьшение сигнала с течением времени. В целом, Куу ведет себя немного иначе и, как уже упоминалось, например, самуианский оррелайнос другими хронологиями в этом кластере (рис. 2) и, таким образом, может скорее рассматриваться как выброс. Мы также должны упомянуть, что влажная хронология из этого местоположения к югу от всех других хронологий. Во всех других кластерах у нас либо более низкий климатический сигнал или сильнейшее поведение относительно разницы сигнала между влажными и сухими участками и более сильная потеря климатического сигнала, как уже упоминалось выше. Другим полезным аспектом использования деревьев из кластера NE для реконструкций температур является то, что у нас также есть самые сильные межхронологические корреляции в кластере, что означает, что можно собирать образцы более обширного региона Фенноскандии, что обычно дает лучший трансрегиональный сигнал и уменьшает шум от индивидуальных факторов участка, так как как помехи или тому подобное. Это в конечном итоге снова приводит к более надежной оценке сигнала и последующей реконструкции температур.

5. Заключение

Наша сеть микросайтов Фенноскандии выявляет общую зависимость темпов роста сосны от широты и температур июля. Однако, в соответствии с географическими условиями окрестностей средней Фенноскандии, сеть кластеризуется в три различные группы прибрежные участки в районе Скандинавских гор в северной Норвегии, континентальные участки и подветренной стороны Скандинавских гор к северу от полярного круга и местоположения к югу от полярного круга.

Различия между влажными и сухими участками, вероятно, вызваны эффектом индукции температурных выводов в соответствии с географическим регионом.

В то время как деревья на влажных микрорайонах в западных районах демонстрируют более высокие темпы роста, эта закономерность меняется на обратную более континентальных условиях на востоке, где на более сухих участках наблюдается увеличение ширины колец. Наряду с широтным увеличением сигналов температуры июля, сосны на влажных участках обычно демонстрируют более высокую зависимость от летнего тепла. Самая высокая температурная чувствительность и согласованность роста обнаружены в тех регионах, где температура в июле колеблется от 11,5 до 13,5 °C, а общее количество осадков в мае падает ниже 100 мм, что делает эту среду идеальным регионом для выборки, направленной на надежную реконструкцию климата на основе годовых колец деревьев.

К. Харгланд

Дендрохронология 65 (2021) 125787

[номера грант ов НА 8048/1-1, Inst 247/665-1 FUGG, ES 161/9-1]. Эт ч а с т и ч н о
подд е р ж и в а л с я NSF-PIRE [номер грант а OISE-1743738] и NSF-P2C2 [номер грант а
AGS-1702439].

Налич ие данных

Данные о ширине годичных колец доступны в Международном банке данных
годичных колец (ITRDB).

Декларация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Мы благодарим муниципалитетам и лесным административным, оторые
предоставили разрешения на отбор проб. Мы благодарим Оли Контера, Лео Шнайдер,
Марию Мишель, Саймона Глазера, Йоханнеса Нойманна, Тинке Рук, Диану Роши
Филиппа Шназа за помощь в полевых и лабораторных работах.

Приложение А. Дополнительные данные

Дополнительный материал, относящийся к этой статье, можно найти в
онлайн-версии по адресу doi:<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125787>.

Ссылки

Банн, А.Г., Коррелла, М., Бионди, Ф., Мерриан, П., Квэдэн, Ф., Занг, К., 2012. dplR:

Библиотека программ дендрохронологии в R.
Бонтген У., Райбиге С.С., Франк Д., Хелама С., Канингем Л., Хофер Д.,
Нивергельт Д., Верстеге А., Тимонен М., Стенсет Н.С., Эспер Дж., Куртс Дж., 2011.
Применение последствие прошлых и прогнозируемых летних температур в Скандинавии, 500–2100 гг. н. э.
PLoS One 6, e25133. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025133>.

Кук, Э.Р., Пигерс, К., 1981. Сглаживающий сплайн: новый подход к стандартизации
лесной интерсерии ширины годичных колец для дендроклиматических исследований. Tree-Ring Bull. 41,
45–55.

Корнес, Р.К., ван дер Шмидт, Г., ван ден Бесселард Э.Дж.М., Джонс, П.Д., 2018.
Ансамблевая версия наборов данных о температуре и осадках E-OBS. J. Geophys.
Res. Atmos. 123, 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>.

Д'Арриго Р.Д., Уилсон Р.Дж.С., Липерт Б., Крубини П., 2008. «Расхождение»
«Проблема» в северных лесах: обзор данных годичных колец и возможные причины
Glob. Planet. Change 60, 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.004>.

Дюхорн, Э., Хольцкэмпфер, С., Тимонен, М., Эспер, Й., 2013. Влияние условий микроклимата на
климатические сигналы годичных колец деревьев в центральном и северном Швеции.
Дерево-я Struct. Funct. 27, 1395–1404. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0887-8>.

Дюхорн, Э., Шнайдер, Л., Контгер, О., Шн, П., Тимонен, М., Эспер, Й., 2015. Ослабление различий
микроклимата в климатических условиях годичных колец деревьев в долине широтного бореального
Фенна. 49 <https://doi.org/10.14214/sf.1220>.

Дюхорн, Э., Шнайдер, Л., Контгер, О., Глазер, С., Эспер Дж., 2016. Экологические и климатические
сигналы хронологических ширины годичных колец деревьев в долине широтного бореального
трансекта. Scand. J. For. Res. 31, 750–757. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1181201>.

Эдвардссон, Й., Рьяус, Э., Корона, К., Симанусис Р., Казис, Й., Стофель, М., 2015. е. Изучение влияния регионального климата и
местной гидрологии на Pinus sylvestris L.
Изменение скорости роста – сравнение популяций сосны растущих на торфяных почвах и минеральных почвах
в Литве. Plant Soil 392, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s1104-015-2466-9>.

Эспер Дж., Франк, Д., 2009. Ошибки и расхождение в исследованиях годичных колец. Климат. Изменение 94,
261–266. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9594-2>.

Эспер Дж., Кук, Э.Р., Крушин, П.Дж., Пигерс, К., 2003. Тесты метода RCS для сохранения низкочастотной
изменчивости и длинных древесно-кольцевых хронологий. Дерево. Res. 59, 81–98.

Эспер, Й., Бонтген У., Тимонен, М., Франк, Д., 2012а. Изменение скорости роста сосны в значительных
температурных северной Скандинавии за последние два тысячелетия. Glob.
Planet. а. Изменение 88–89, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.01.006>.

Эспер Дж., Франк Д., Тимонен М., Зорит А., Уилсон Р.Дж.С., Лотербахер Дж., Хольцкэмпфер, С.,
Фишер Н., Ватнер С., Нивергельт Д., Верстеге А., Бонтген У., 2012б. Орбитальное форсирование
данных годичных колец. Нат. Клим. Чанг. 2, 862–866. <https://doi.org/10.1038/nclimate1589>.

Эспер Дж., Дюхорн, Э., Крушин, П.Дж., Тимонен, М., Бонтген У., 2014. Изменения летних температур в
Северной Европе в течение нашей эры по данным комплексных данных о плотности годичных
колец деревьев: летние температуры Северной Европы в нашу эру. J. Quat. Sci. 29, 487–494. <https://doi.org/10.1002/jqs.2726>.

Грудд, Х., 2008. Torneutrask – ширина годичных колец деревьев в 500–2004 гг.: испытание климатических
чувствительности и новая 1500-летняя реконструкция лет в Северной Фенноскандии.
Климат. Дин. 31, 843–857. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0358-2>.

Гуннарссон, ВЕ, 2001. Изменения уровня озера, выявленные дендрохронологией на субфоссильной сосне,
Янгланд, Центральные Скандинавские горы Швеция. Arct. Antarct. Alp. Res. 33, 274–281. <https://doi.org/10.1080/15230430.2001.12003431>.

Харгланд, К., Сент-Джордж, С., Контгер, О., Харр, Л., Шаль, С., Д., Кирххейфер, А., Эспер Дж., 2019.
Дендрохронология войны деревьев – свидетельство разветвления немецкого линкора «Ирландия» в Норвегии.
Antropocene 27, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2019.100212>.

Харгланд-Майер, К., Дитмар, К., Занг, К., Рот, А., 2014. Реакция роста горных лесов на изменение климата в
Северных Известных Альпах. Деревья – Структура. Функц. 28, 819–829. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1>.

Хелама С., Мелик-айнен К., Тимонен М., Эронен М., 2008. Финская хронология сверхдлинных годичных колец
простирается до 5634 г. до н.э. Ни. Географ. Труды 62, 271–277. <https://doi.org/10.1080/00291950802517593>.

Хеллманн, Л., Агафонов, Л., Югквист, Ф.К., Чуракова Сидорова, О., Дюхорн Э.,
Эспер, Й., Хольцманн, Л., Кирьянов, А.В., Моисеев, П., Муглан, В.С., Николаев, А.Н., Рейниг, Ф., Швайнгрубер
Ф.Х., Соломина, Т.Гель, В., Бонтген, У., 2016. Разнообразные тенденции роста и климатических
реакций в бореальных лесах Евразии. Экологические исследования.
Лет. 11, 074021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074021>.

Холмс, Р.Л., 1983. Комбинированный контроль качества в приращивании годичных колец и
измерение. Tree-Ring Bull. 43, 69–78.
массива. С., 2012. Альпийские линии деревьев: функциональная экология глобального высокогорного древесного
Корнер. Предельный Springer, Базель [ua].

Ланге, Дж., Бурас, А., Рус-Гарсия, Р., Гуркая, М., Ялкянен, Р., Кукарский, В., Сео, Дж.-В., Вилькинсон, М., 2018.
Климатические режимы преопределяют раскисляющие эффекты летних температурных сигналов сосны
обыкновенной на северных границах ее распространения. Фронт. Plant Sci. 9, 1597. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01597>.

Линдхольм, М.Х., 2001. Влияние климата на рост сосновых обыкновенной на сухих и влажных почвах в горах
Центральной Скандинавии, интерпретированное по ширине годичных колец. Сильва Фенна. 35
<https://doi.org/10.14214/sf.574>.

Линдхольм, М.Х.В., Гуннарссон, Б.Э., 2005. Изменчивость летних температур в центральной Скандинавии
за последние 3600 лет. Geogr. Ann. Ser. A Phys. Geogr. 87, 231–241. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00255.x>.

Линдхольм, М.Х.В., Мюберг, А., Грудд, Х., 2002. Торфяные сосняки как климатические индикаторы?
Региональное сравнение климатического влияния на рост сосновых обыкновенной в Швеции Канта.
J. For. Res. 32, 1400–1410. <https://doi.org/10.1139/x02-071>.

Линдхольм, М.Х.В., Беркунд, Т.А., Сефтиген, К., Гуннарссон, Б.Э., Грудд, Х., Чон, Дж.-Х., Дробышев, И., Лю
Й., 2010. Дендроклиматология в Фенноскандии – от прошлых достижений к будущему
потенциалу. Климат. Обсуждение прошлого 6, 93–114. <https://doi.org/10.5194/cp-6-93-2010>.

Linderholm, HW, Zhang, P., Gunnarsson, BE, Björklund, T., Farahat, E., Fuentes, M., Rocha, E., Salo, R., Seftigen,
K., Stridebeck, P., Liu, Y., 2014. Динамика роста сосновых обыкновенной (Pinus sylvestris L.) на границе леса
и на побережье озер в центральной Скандинавских горах во время средневековой климатической
аномалии раннего малого ледникового периода. Фронт.
Экол. Эволюция 2 <https://doi.org/10.3389/fevo.2014.00020>.

Loader, NJ, Young, GHF, Grudd, H., McCarroll, D., 2013. Стабильные изотопы углерода из Торнеграска, северная
Швеция, обеспечивают реконструкцию летней солнечной активности за тысячелетнюю историю
связи с циркуляцией в Арктике. Quat. Sci. Rev. 62, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.014>.

Мацковский, В.В., Хелама, С., 2014. Тестирование многолетних летних температур
реконструкция на основе хронологий максимальной плотности и полученных путем повторного
анализа наборов данных годичных колец деревьев с севера Швеции и Финляндии. Климат.
Прошлое Обсуждение. 10, 1473–1487. <https://doi.org/10.5194/cp-10-1473-2014>.

Мак Кэрролл, Д., Лоадер, Н.Юджерси, Ялкянен, Р., Гаген, М.Х., Грудд, Х., Гуннарссон, Б.Е.,
Кирххейфер, А.Дж., Фридрих, М., Линдхольм, М.Х.В., Линдхольм, М., Бетгер, Т., Лос, С.
О., Реммеле, С., Канонов ЮМ., Ямадзаки Ю., Янг Г.Х., Зорит А.Э., 2013.
1200-летняя мультитропосферная запись роста деревьев и летней температуры северной границы
сосновых лесов Европы. Голоцен 23, 471–484. <https://doi.org/10.1177/0959683612467483>.

Мостеллер, Ф., Тьюки, Дж.В., 1977. Анализ данных и регрессия: второй курс по статистике и серия
Эддисона-Уэсли по поведению естественных наук. Климатические методы
Addison-Wesley Pub. Co., Реддинг, Массачусетс.

Паульсен, Дж., Вебер, У.М., Корнер, К., 2000. Рост деревьев вблизи линии леса: реакция или постепенное
снижение с высотой? Arct. Antarct. Alp. Res. 32, 14–20.

Wilkinson, M., D'Arrigo, R., Jacoby, GC, Junday, GP, 2005. Повышение температуры
чувствительности и расхождение в тенденциях роста в циркулярных бореальных лесах. Геофиз. исследования.
Лет. 32, 1571575. <https://doi.org/10.1029/2005GL023331>.

Вилкинсон, ван дер Маат-Туниссен, М., ван дер Маат-ен, Э., Шарнвебер, Т., Бурас, А., Бирманн, К.,
Гуркая, М., Халлингер, М., Ланге, Дж., Шетт, Р., Смилеян, М., Руйе, М., 2020. Глобальная
оценка взаимосвязи между климатом и ростом деревьев. Glob Change Biol gcb. 15057 <https://doi.org/10.1111/gcb.15057>.

Вуд, С.Н., 2017. Обобщенные аддитивные модели: введение с R. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>.

Young, GHF, McCarroll, D., Loader, NJ, Gagen, MH, Kirchhefer, AJ, Demmler, JC, 2012. Изменения в атмосферной
циркуляции и Арктических колебаниях, сохраненные в рамках реконструкции летнего
облачного покрова северной Фенноскандии за тысячелетнюю историю. Clim. Dyn. 39, 495–507. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1246-3>.

Занг, К., Бионди, Ф., 2015. Treeclim: пакет R для численной калибровки и зависимости экологического
Ecography 38, 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>.