



Список и содержания доступны на сайте e ScienceDirect

Дендрохронология

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



Оригинальная статья

Микроклиматические условия влияют на рост лесов Фенноскандии

Клаудия Хартла,*, Элизабет Дюхорн, Эрнест Тедер Андрес Й. Кирххейфер, Маури Тимонен, Штеффен Хольцхаммер, Ульф Бюнтген, Ян Эспер

^a Географический факультет, Университет Йоганна Гутенберга, Майнц, Германия
^b Кафедра атмосферных и экологических наук, Университет Обини (SUNY), Обини, Нью-Йорк, США
^c Dendroökologen AJ Kirchhefer, Тромсё, Норвегия
^d Институт природных ресурсов Финляндии Рованиemi, Финляндия
^e Кафедра физико-географической географии, Стокгольмский университет, Стокгольм, Швеция
^f Географический факультет Кембриджского университета, Великобритания
Швейцарский 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
Состояние новизны
Сеть кольцевых деревьев

АБСТРАКТ

Давняя традиция дендроклиматологических исследований в Фенноскандии подкрепляется исторической долговечностью и температурной чувствительностью роста 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 биоработанных северной Фенноскандии, до сих пор неясно, имеют ли значительные различия в экологии микроклимата, и если да, то были ли они в достаточной степени выявлены предыдущими исследованиями. 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 обеспечивает влияние влажных берегов озера и сухих внутренних микроклиматов на рост деревьев. Наша сеть выявляет сильную зависимость роста сосны от температуры июля, которая также отражается в широте. Различия в продуктивности и леса между влажными и сухими микроклиматами, вероятно, выявлены с помощью эффекта температуры июля 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 роста к температуре июля, сосна влажных участков демонстрирует повышенную зависимость от летнего тепла. Самая высокая температурная чувствительность и согласованность роста, а следовательно, и наилучшая 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 сайтов.

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 (ядро), 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 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-корреспондент.
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 естественная 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 низким температурой, 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)соответствие средним хронологиям 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 объяснить изменения роста и реакцию на климат средним микроуровнем 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

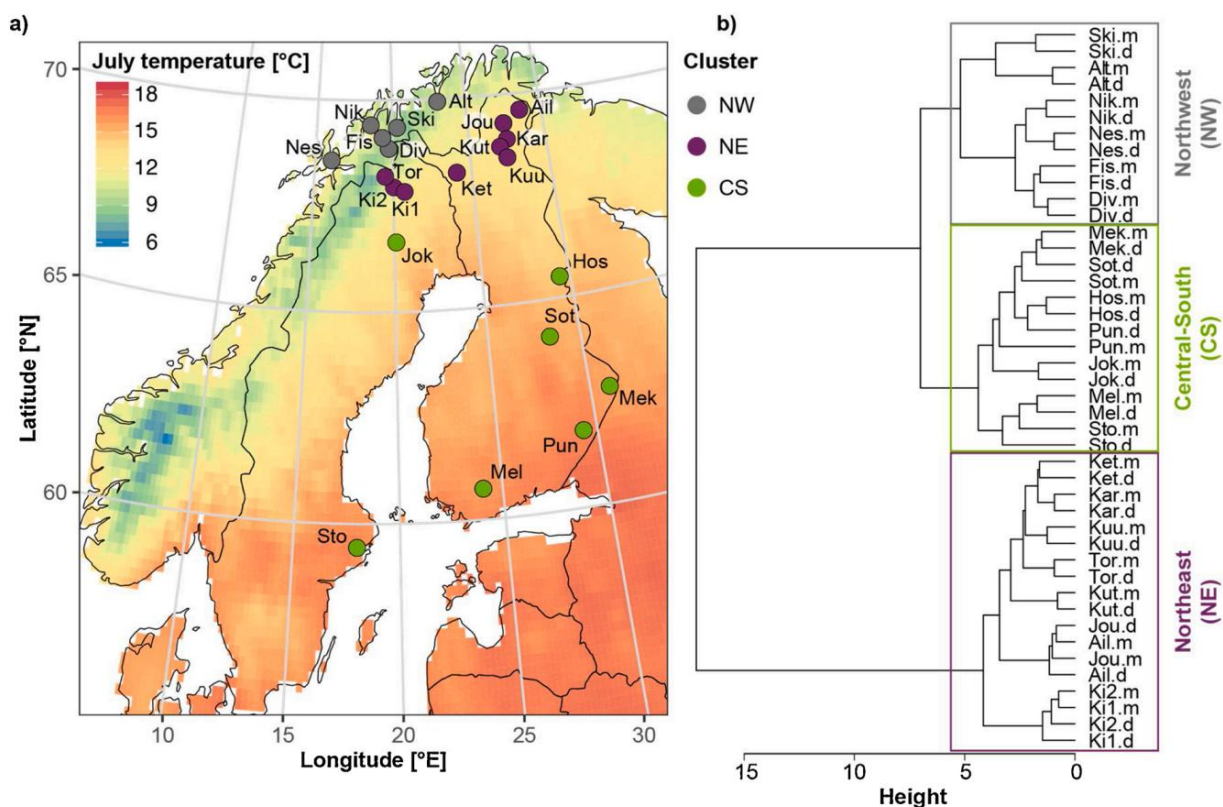


Рис. 1. а) Сеть из 44 микроуровневых ширины годичных колец деревьев по всей Фенноскандии, наложенная на средние значения температур июля, основанные на инструментальных измерениях за период 1961–1990 гг. б) Иерархический кластерный анализ хронологий 44 микроуровневых, рассчитанных за общий период 1903–2006 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 измерительных приборов LINTAB и программного обеспечения TSAPWin (оба Rinntech, Гейдельберг, Германия). Перекрестное датирование проверялось визуальным истинным использованием программы COFECOA ([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 статистические включения: средняя длина ряда (MSL), представляющая среднюю возрастную структуру деревьев в хронологии микроучастка, средняя скорость роста необработанных данных о ширине годовых колец (AGRall), представляющая среднюю ширину годовых колец всего насаждения микроучастка, и автокорреляция 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 микросайтах или коэффициента 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 датирование (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](#)).

www.sciencedirect.com

Сайт	Классификация	Широта	Длина ряда	MSL	AGRall	Pear		Lag-1*		Число	
						Сухой	Влажный	Сухой	Влажный	Сухой	Влажный
Am	CB	69.52	120	872	0.880		0.39	0.32	0.65	110	
Баль-Т		69.92	73	438	0.84		0.83	0.3	0.76	93	73
Дания-Юн		68.86	320	86	0.94		0.08	0.23	0.66	105	77
Окс		69.08	259	89	0.88		0.29	0.29	0.75	701	99
Хос	КС			300							
Алек	КС	66.65	302	87	0.82		0.39	0.27	0.6	126	86
Амун	CB	69.26	200	96	0.82		0.33	0.27	0.74	170	144
Кар	CB	68.83	258	82	0.88		0.45	0.35	0.68	74	126
Кет	CB	68.22	300	83	0.88		0.81	0.27	0.73	66	49
К-И	CB	67.9	451	89	0.84		0.39	0.38	0.79	60	68
К-2	CB	67.95	430	86	0.72		0.35	0.37	0.7	104	87
КуТ	CB	68.77	170	544	0.79		0.68	0.43	0.85	80	73
Нбу		68.45	302	88	0.89		0.04	0.28	0.61	87	88
		62.73	147	89	0.88		0.35	0.23	0.74	125	88
Мун	КС	60.73	120	89	0.84		0.28	0.28	0.63	116	93
Евкс		68.57	345	96	0.86		0.52	0.22	0.53	71	93
Нкс		69.36	90	80	0.87		0.34	0.29	0.72	69	63
		61.81	78	401	0.37		0.37	0.43	0.81	102	84
Влажный	КС		72	94	0.46		0.29	0.22	0.7	104	98
		69.35									
Сот	КС	64.12	148	95	0.96		0.26	0.16	0.77	93	98
Сго	КС	59.44	20	93	0.80		0.38	0.26	0.57	58	69
Тор	CB	68.2	390	89	0.80		0.35	0.27	0.67	97	79

2.5 Климатические сигналы

Анализ реактивности 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). Бутстрапированные 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 treeclim (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 центрально-южная 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

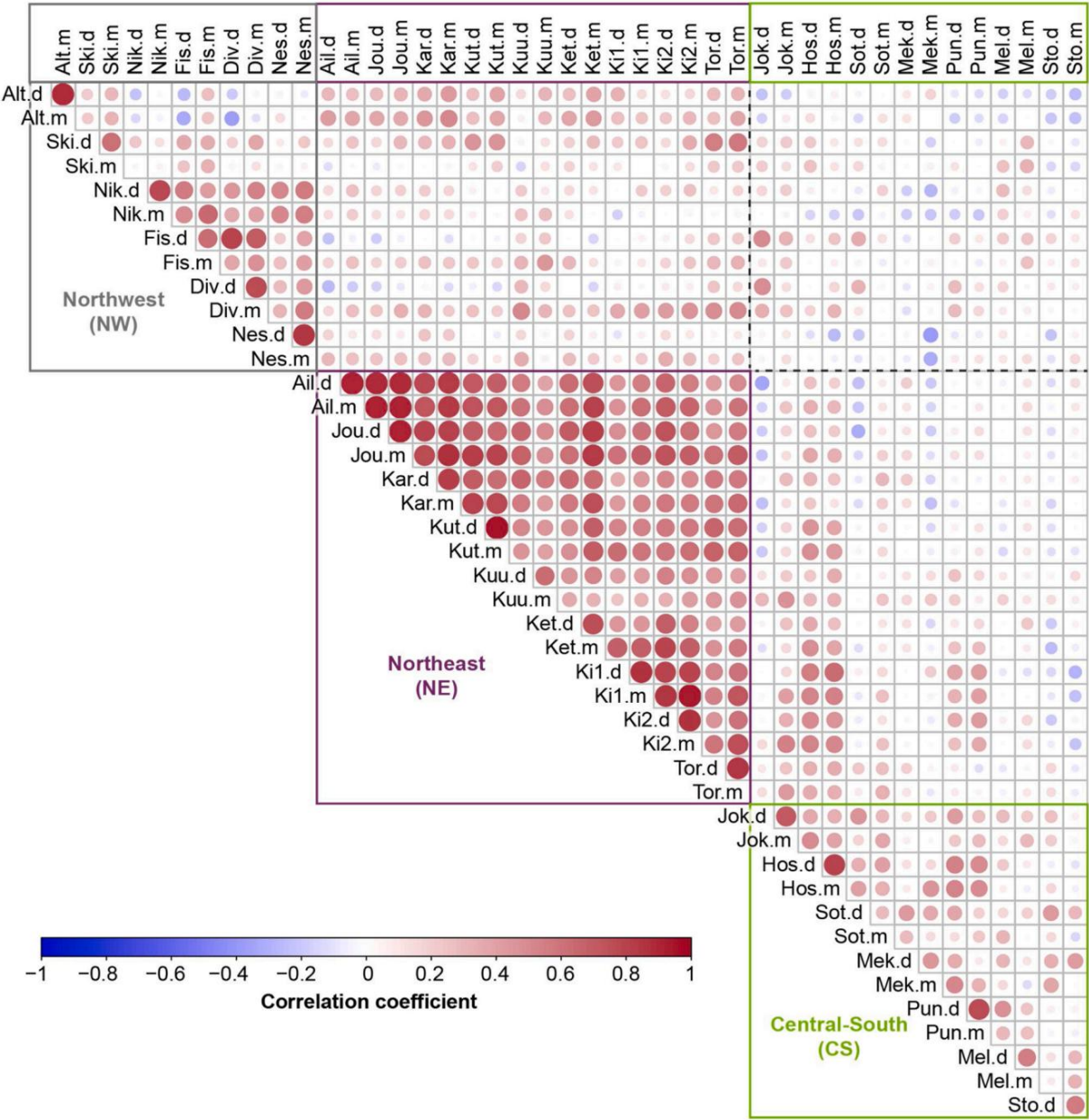


Рис. 2. Коэффициент корреляции Пирсона (представленные цветом и размером круга) между всеми 44 хронологиями микророста Фенноскандии, рассчитанными за общий период 1903–2006 гг. (хотя у Куу.м. (ороч.е).

ближе друг к другу, чем к хронологии микросайта из другого местоположения (рис. 1b), за исключением кластера NW, где наиболее 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 вывести из рис. 1b.

Матрица корреляции (рис. 2) подчеркивает и уточняет результаты HCA, хотя она также показывает общепоследовательность изменений восточного года к году при рассмотрении всей сети. Например, самые северные хронологии из Alt антикоррелированы 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, показывая коэффициент корреляции $r = 0,4$ с учетом всех хронологий. Только к хронологии из Куу показывают 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 $r = -0,37$ с внутренними хронологиями Fis и Div). В кластере CS мы не находим последовательной ковариации между хронологиями с широким диапазоном значений r .

Ковариация 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 $0,88$ ковариация внутриместоположения 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 подтверждаются очевидными также визуально. Хронологии в пределах NE кластера имеют очень высокую синхронность, что также отражено в высоких значениях r_{barC} , хотя их 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 к хронологии Alt выделяется 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 цветные ветви представляют 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} относятся 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 не зависит от MSL, при этом GAM объясняет 34% дисперсии, и нет никакой разницы во влажных или сухих микросайтах, а также форма модели 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 годовых колебаний насаждения, б) AGRC40 представляет средний прирост за первые 40 лет жизни дерева и c) различия в сухом и влажном микрорастении к AGRC40 ($\Delta\text{AGRC40} = \text{AGRC40.d} - \text{AGRC40.m}$).

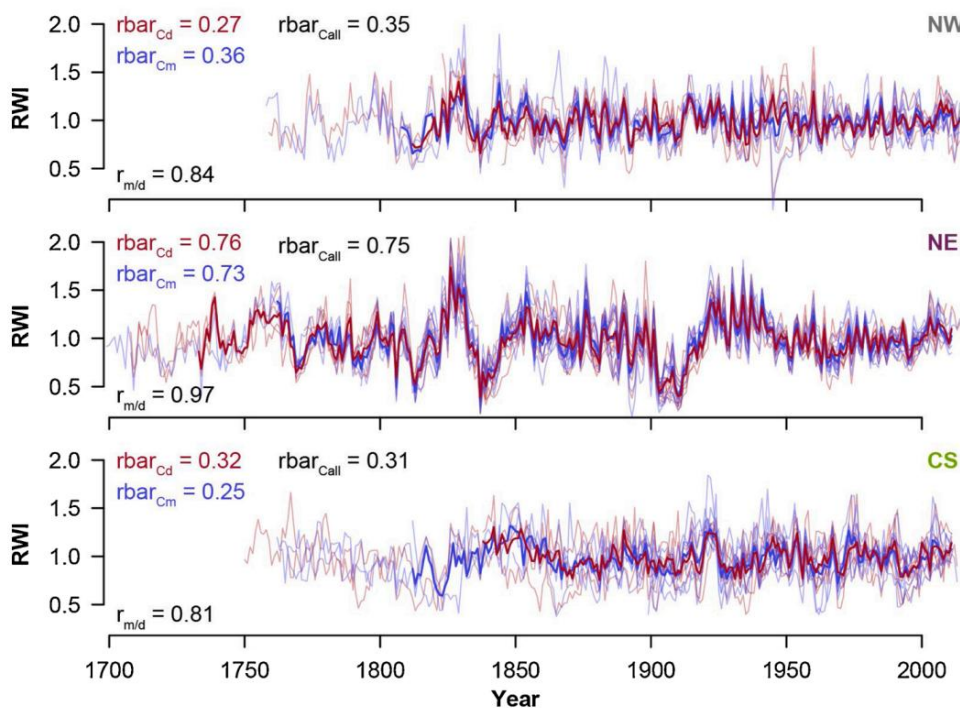


Рис. 3. Все 44 хронологии микросайтов, нанесенные на график в пределах соответствующего кластера. Полупрозрачные красные/синие цветные ветви представляют сухие/влажные хронологии микросайтов в кластере NW (верхняя панель), кластере NE (средняя панель) и кластере CS (нижняя панель), а жирные линии указывают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

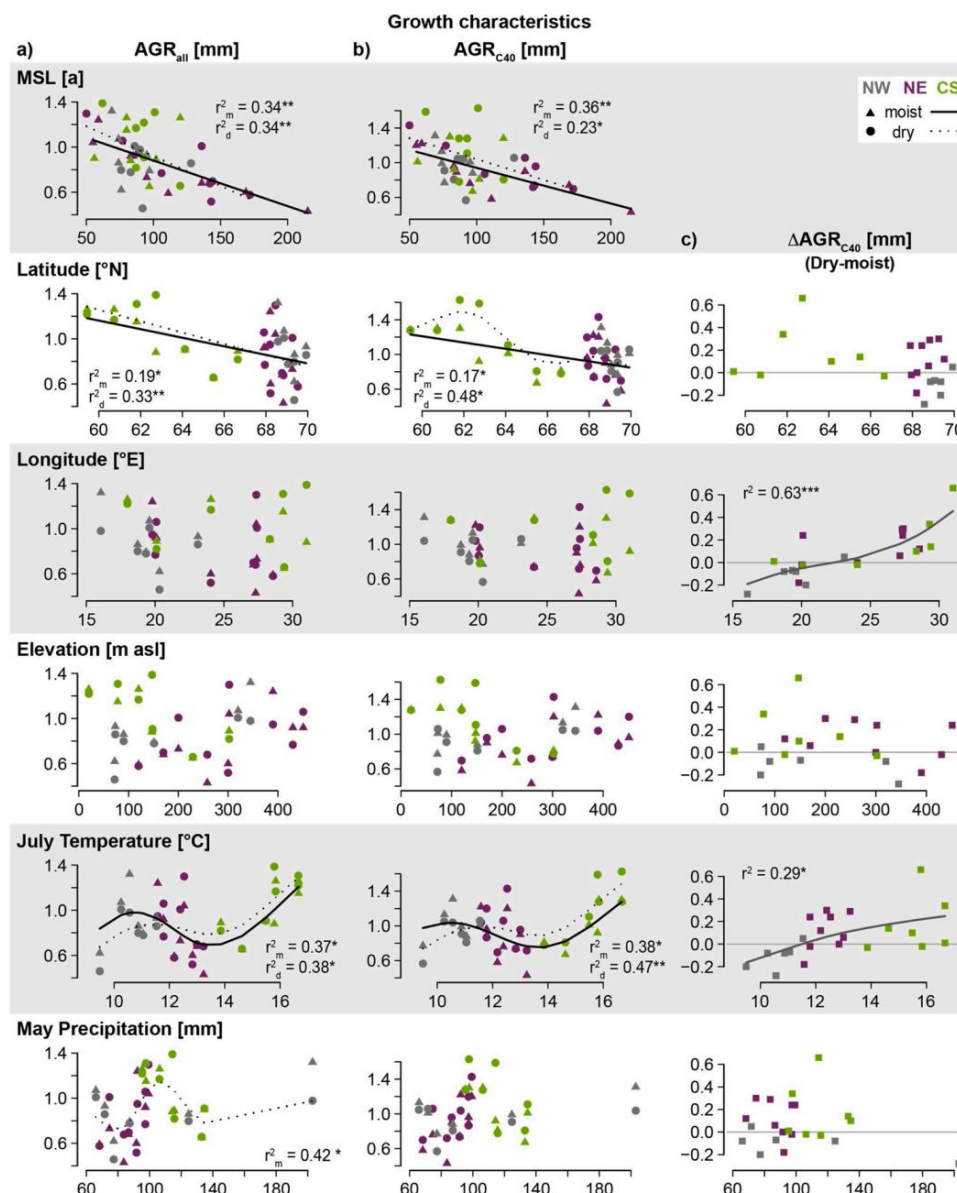


Рис. 4. Температурная функция средней длины года (MSL) и различных абiotic факторов участка. а) Средний темп роста (AGRall), представляющий среднюю ширину колец всего насаждения, б) AGR40 представляет средний прирост за первые 40 лет возраста дерева, и в) разность сухого и влажного микроучастка AGR40 ($\Delta\text{AGR40} = \text{AGR40.d} - \text{AGR40.m}$).

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 AGRall кажется независимым от сумм осадков. GAM только частично объясняет дисперсию AGRall для влажных микросайтов (42%).

Мы рассматривали AGR40 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 AGR40, 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 AGRall, 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 (ΔAGR40) более надёжно сосредоточиться на AGR40, 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 имеет значительную степень предвзятости для кластера 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 среди всей сети июль является наиболее частым месяцем, показывающим 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 сетей микроростков, и эти изменения частично можно объяснить абiotическими факторами. Построение графика зависимости реакции температуры от абiotических факторов показывает, что сигнал не увеличивается линейно с широтой (рис. 6а). Корреляции увеличиваются 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 некоррелируемые дисперсии коэффициентов корреляции, но 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, подобно 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 сухие и влажные микроростки показывают 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 температуры влажных микроростков показывают существенное увеличение ($\Delta r < -0,16$), тогда как три сухих микроростка и пять влажных микроростков

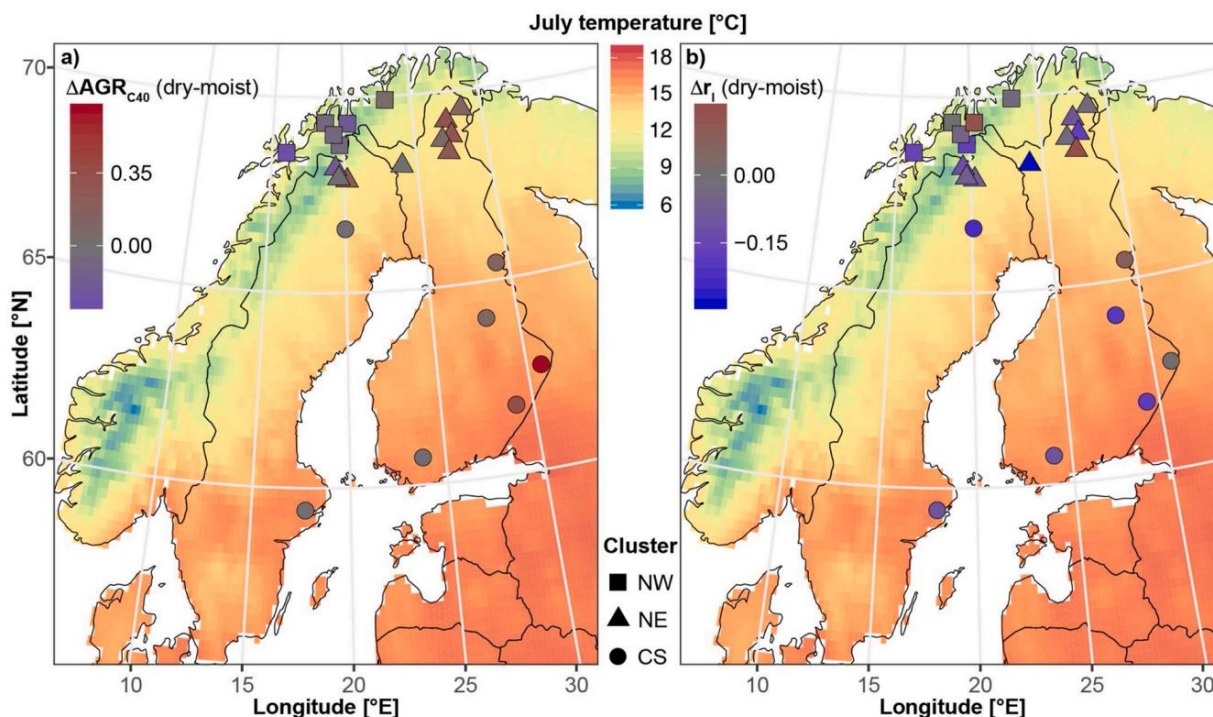


Рис. 5. Пространственная картина различий между сухими и влажными микроростками. а) Разница в средней скорости роста в ювенильной фазе (возраст камбия 1–41, сухой – влажный), где красные цвета указывают на более высокие скорости роста на сухом микроростке, серые цвета указывают на почти отсутствующие 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 ссылки отсылают к веб-версии этой статьи.

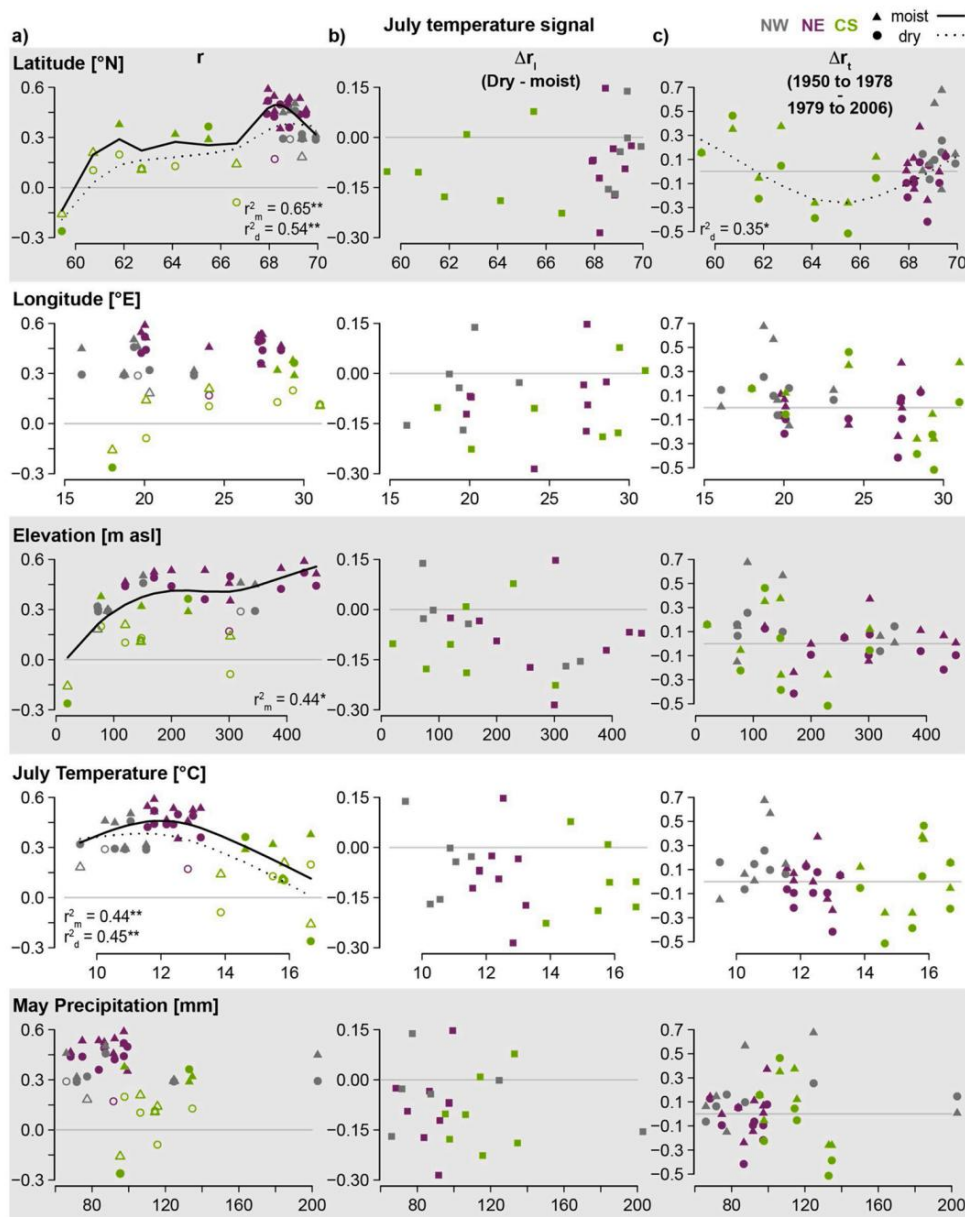


Рис. 6. Модели реакции температуры июля и мая на микросайты как функция различных абiotических факторов сайта. а) Коэффициент корреляции хронологий микросайтов с температурой июля за период 1950-2006 гг. Заполненные символы указывают на значимые корреляции при $p < 0,05$. б) Разница коэффициента корреляции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

показывают существенное снижение ($\Delta r_t > 0,16$) температурной чувствительности. 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 0,63 в кластере 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 кластере 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 гравитации 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 Фенноскандии в основном контролирует широтой и температурой, независимо от микросайта (рис. 4). Средняя ширина колец уменьшается с увеличением широты поскольку к границе леса становится 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 контролируются Северо-Атлантическим течением (продолжением Гольфстрима в Северной Европе), которое 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 азала 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 экологических объяснений, 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 температуры 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 извлечь 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.

Потенциально, как правило, довольно мало и существенно только в восьмилетних 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 температуры климата, что идеально подходит для объединения данных о живых деревьях с субфоссиальным материалом для датирования 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 восток участки даже наблюдается увеличение сигнала. Только на одном участке (Куу) хронология сухого микрорайона имеет более высокий сигнал температурных колец, 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 в влажной хронологии из этого местоположения к орочам 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 тенденция к климатическому сигналу, 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 их помехи или томоподобные. 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 температурных колец. 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 т температурных колец 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 континентальными условиями на востоке, где на более сухих участках наблюдается увеличение ширины колец. Наряду с широтным увеличением сигналов температурных колец, сосны на влажных участках обычно демонстрируют более высокую зависимость от летнего тепла. Самая высокая температурная чувствительность и согласованность роста обнаружены в этих 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.

[номера грант ов НА 8048/1-1, Inst 247/665-1 FUGG, ES 161/9-1]. Ет ч а ст ич но подд ерживался NSF-PIRE [номер грант а OISE-1743738] и NSF-P2C2 [номер грант а AGS-1702439].

Налич ие данных

Данные о ширине годич ных колец дост упны в Международ ном банк е данных годич ных колец (ITRDB).

Дек ларац ия о конфлик те инт ересов

Авт оры заявляют обот сут ст вии конфлик та инт ересов.

Благодарност и

Мы благодарим муницип алит ет ами лесным админист рац иям, к от орые предост авили раз решения на от бор проб. Мы благодарим Оли К онт ера, Лео Шнайдер, Марию Мишель , Саймона Глазера, Йоханнеса Нойманна, Т инек е Рук , Диану Роши Филиппа Шна за помощь в полевых и лаборат орных работ ах.

Приложение А. Дополнит ель ные данные

Дополнит ель ный мат ериал, от носящийся к эт ой ст ат ье, можно найт и в онлайн-версии по адре су doi:<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125787>.

Ссылк и

Банн А.Г., К оргела М., Бюнд и Ф., Меран П., Ке адан Ф., Занг К ., 2012. dPlR: Бибиот ек а программ по дендрохронологии в R. *Лесной инт ерь ер*: ряд ширины годич ных колец для дендроклимат ических исследований. *Tree-Ring Bull.* 41, 45–55.

Бюнт ген У., Райбле С.С., Франк Д., Хелама С., К аннингем Л., Хофер Д., Нивергель т Д., Верст еге А., Т имонен М., Ст енсет Н.С., Эспер Дж., Курт с Дж., 2011. Прич ины послед ст вия прошлых и прогнозируемых лет них т емператур в Ск андинавии, 500–2100 гг. н. э. *PLoS One* 6, e25133. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025133>.

Кук , Э.Р., Пит ерс, К ., 1981. Сглаживающий сплайн: новый подход к ст андарт изац ии Лесной инт ерь ер: ряд ширины годич ных колец для дендроклимат ических исследований. *Tree-Ring Bull.* 41, 45–55.

К орнес, Р.К., ван дер Шмидт, Г., ван ден Бесселар, Э.Д.Ж., Джонс, П.Д., 2018. Ансамблевая версия наборов данных о т емпературе и осад ках E-OBS. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017J0028200>.

Д'Арриго Р.Д., Уилсон Р.Д.Ж., Липерг Б., К ерубини П., 2008. О «расхождении» «Проблема» в северных лесах: обзор данных годич ных колец и возможные прич ины *Glob. Planet. Change* 60, 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.004>.

Дюкхорн, Э., Хольц к ампер С., Т имонен, М., Эспер, Й., 2013. Влияние условий мик роуас т к а на климат ические сигналы годич ных колец деревь е в ит енденц ии в цент ральной и северной Швец ии. *Деревья – Struct. Funct.* 27, 1395–1404. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0887-8>.

Дюкхорн, Э., Шайдер Л., К онт ер О., Шн, П., Т имонен, М., Эспер, Й., 2015. Оск рыт ом знач ении различ ных мик росайт ов в климат ических реконст рукц иях на основе годич ных колец . *Силь ва Фенн.* 49 <https://doi.org/10.14214/sf.1220>.

Дюкхорн, Э., Шайдер Л., Гюнт ер Б., Глазер Т .С., Эспер Дж., 2016. Эколог ические и климат олог ические сигналы хронологиях ширины плот ност и годич ных колец деревь е в в доль широт ного бореаль ного т ранск та. *Scand. J. For. Res.* 31, 750–757. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1181201>.

Эдвардссон, Й., Рямус, Э., К орона, К ., Симануакин Р., К азик, Й., Ст офель, М., 2015. е, Изуч ение влияния региональ ного климат а и мест ной гидрологии на Pinus sylvestris L. *Изм енч ивост ь* – рост а – сравнение популяц ий сосны раст ущих на т орфяных поч вах и минераль ных поч вах в Лит ве. *Plant Soil* 392, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2466-9> .

Эспер Дж., Франк , Д., 2009. Ошибки и расхождение в исслед овании годич ных колец . *Климат . Изм енение* 94, 261–266. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9594-2>.

Эспер Дж., Кук , Э.Р., К рушин , П.Дж., Пит ерс, К ., 2003. Т ест ымет од а RCS для сохранения низк оч аст от ной изм енч ивост и в длинных древесно-коль ц евых хронологиях. *Деревья. Res.* 59, 81–98.

Эспер, Й., Бюнт ген У., Т имонен, М., Франк , Д., 2012а. Изм енч ивост ь изк стремаль ные знач ения лет них т емператур в северной Ск андинавии за послед ние два т ысяч елет ия. *Glob. Planet а. Изм енение* 88–89, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.01.006>.

Эспер Дж., Франк Д., Т имонен М., Зориг а Э., Уилсон Р.Д.Ж., Люг ербахер Дж., Хольц к ампер С., Фишер Н., Вагнер С., Нивергель т Д., Верст еге А., Бюнт ген У., 2012б. Орбит аль ное форсирование данных годич ных колец . *Нат . К лим. Чанг.* 2, 862–866. <https://doi.org/10.1038/nclimate1589>.

Эспер Дж., Дюкхорн, Э., К рушин , П.Дж., Т имонен, М., Бюнт ген У., 2014. Изм енения лет них т емператур в Северной Европе в т еч ение нашей эры по данным комплекс ных данных о плот ност и годич ных колец деревь е: лет ние т емпературы в Северной Европе в нашу эру. *J. Quat. Sci.* 29, 487–494. <https://doi.org/10.1002/jqs.2726>.

Грудд, Х., 2008. Torneetrack ь ширина и плот ност ь годич ных колец деревь е в в 500–2004 гг.: испыт ание климат ических чув ст витель ност ь и новая 1500-лет няя реконст рукц ия лет а в Северной Фенноск андии. *Климат . Дин.* 31, 843–857. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0358-2>.

Гуннарсон, Б.Е., 2001. Изм енения уровня оз ера, выявленные дендрохронологией на субфоссильной сосне, Ямг ланд., Ц ент раль ные Ск андинавские горы Швец ии. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 33, 274–281. <https://doi.org/10.1080/15230430.2001.12003431>.

Харгл, К., Сент -Джордж, С., К онт ер О., Харр Л., Шльц к , Д., К ирххейфер А., Эспер Дж., 2019. Дендрохронология войны деревь я — свидет ели раз верт ывания немец к ого линк ора «Т ирпиц » в Норвегии. *Антропог ен* 27, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2019.100212>.

Харгл-Майер, К., Дигт мар, К., Занг, К., Рот е, А., 2014. Реакц ия роста горных лесов на изм енение климат а в Северных Извест ных овах Аль псх. *Деревья – Ст рукт ура. Функц .* 28, 819–829. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1>.

Хелама С., Милек айнен К., Т имонен М., Эронен М., 2008. Финская хронология сверхдлинных годич ных колец прост ирает ся до 5634 г. до н.э. *Ни геогр. Т идск р.* 62, 271–277. <https://doi.org/10.1080/00291950802517593> .

Хеллманн Л., Агафонов Л., Люнгк вист Ф.К., Чуракова Сидорова О., Дюкхорн Э., Эспер, Й., Хюльсманн, Л., К ирдьянов, А.В., Моисеев, П., Мыглан, В.С., Ник олаев, А.Н., Рейнинг, Ф., Швайнг рубер Ф.Х., Соломина, О., Т егель , В., Бюнт ген У., 2016. Разнообразные т енденц ии роста и климат ические реакц ии в бореаль ных лесах Евразии. *Эколог ические исслед ования. Лет т .* 11, 074021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/117/074021>.

Холмс, Р.Л., 1983. К омп ь ютерный к онт роль кач еств при дат ировании годич ных колец и изм ерение. *Tree-Ring Bull.* 43, 69–78.

массива. .С., 2012. Аль пийск ие линии деревь е в: функц иональная экология глобаль ного высок ого горного др евесного К орнер. *Пред елы Springer, Базель [ua]*.

Ланге, Дж., Бурас, А., К рус-Гарсия, Р., Гурская, М., Ялканен, Р., К уаркс ий, В., Сео, Дж.-В., Виль мкин, М., 2018. Климат ические режимы перепределяют мик росайт овые эффек ты лет ний т емпературный сигнал сосны обх новенной на северных границ ах ее распрост ранения. *Фронт . Plant Sci.* 9, 1597. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01597>.

Линдехольм, Х., 2001. Влияние климат а на рост сосны обх новенной на сухих и влажных поч вах в горах Ц ент ральной Ск андинавии, инт ерпрет ированное по ширине годич ных колец . *Силь ва Фенн.* 35 <https://doi.org/10.14214/sf.574>.

Линдехольм, Х.В., Гуннарсон, Б.Э., 2005. Изм енч ивост ь лет них т емператур в цент ральной Ск андинавии за послед ние 3600 лет . *Geogr. Ann. Ser. A Phys. Geogr.* 87, 231–241. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00255.x>.

Линдехольм, Х.В., Мюберг, А., Грудд, Х., 2002. Т орфяные сосны как климат ические индик ат оры Региональное сравнение климат ического влияния на рост сосны обх новенной в Швец ии. *Кан. J. For. Res.* 32, 1400–1410. <https://doi.org/10.1139/x02-071>.

Линдехольм, Х.В., Бьорк лунд, Т .Я., Сефтиген, К., Гуннарсон, Б.Э., Грудд, Х., Чон, Дж.-Х., Дробышев, И., Лю Й., 2010. Дендроклимат ология в Фенноск андии – от прошлых дост ижений к будущему пот енциалу. *Климат . Обсуждение прошлого* 6, 93–114. <https://doi.org/10.5194/cp-6-93-2010>.

Linderholm, HW, Zhang, P., Gunnarson, BE, Björklund, T .J., Farahat, E., Fuentes, M., Rocha, E., Salo, R., Seftigen, K., Stridbeck, P., Liu, Y., 2014. Динамик а роста сосны обх новенной (Pinus sylvestris L.) на границ е леса и на побережье озер в цент раль ных Ск андинавских горах во время сред невековой климат ической аномалии раннего малого о ледникового периода. *Фронт . Экол. Эволюция* 2 <https://doi.org/10.3389/fevo.2014.00020>.

Loader, NJ, Young, GHF, Grudd, H., McCarroll, D., 2013. Ст абиль ные изот опные уровни из т орфяного леса, северная Швеция, обеспечи вают реконст рукц ию лет ней солнеч ной акт ивност и за т ысяч елет ную историю ее связ ь с циркуляц ией в Аркти ке. *Quat. Sci. Rev.* 62, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.014>.

Маяковский, В.В., Хелама, С., 2014. Т естирование многолетних лет них т емператур реконст рукц ия на основе хронологий макс имальной плот ност и, получен ных путем повтор ного анализа наборов данных годич ных колец деревь е в с самого севера Швец ии и Финляндии. *Климат . Прошлое Обсуждение.* 10, 1473–1487. <https://doi.org/10.5194/cp-10-1473-2014>.

Мак Кэрролл, Д., Лоадер, Н.Б.Джерси, Ялканен, Р., Гаген, М.Х., Грудд, Х., Гуннарсон, Б.Е., К ирххейфер А.Дж., Фридрих, М., Линдехольм, М.Х.В., Линдхольм, М., Бет т ерт , Лос С. О., Ремеле, С., Кононов Ю.М., Ямазак и Ю.К., Янг Г.Х., Зориг а Э., 2013. 1200-лет няя мульт ипрокси запись роста деревь е в лет ней т емпературы северной границ е сосновых лесов Европы Голоц ен 23, 471–484. <https://doi.org/10.1177/0959683612467483>.

Мостеллер, Ф., Т ьх и Дж.В., 1977. Анализ данных и регрессия: второй курс по ст ат ист ике, серия Эддисона-Уэсли по поведенческой ой наук е. К олич ественные мет оды Addison-Wesley Pub. Co., Рединг, Массач усет с.

Паульсен, Дж., Вебер, У.М., К орнер К ., 2000. Рост деревь е вблизи линии леса: рез к ое или постепенное снижение с высотой? *Arct. Antarct. Alp. Res.* 32, 14–20.

Wilmking, M., D'Arrigo, R., Jacoby, GC, Juday, GP, 2005. Повышение т емпературы Чув ст витель ност и расходящиеся т енденц ии роста в циркумполярных бореальных лесах. *Геофиз. исследования. Лет т .* 32, 115715. <https://doi.org/10.1029/2005GL023331>.

Вилкин, ван дер Маат-т еуниссен, М., ван дер Маат-ен, Э., Шарнвебер, Т., Бурас, А., Бирманн, К., Гурская, М., Халлингер, М., Ланге, Дж., Цет т и Р., Смил янич М., Т руе, М., 2020. Глобальная оц енка взаимосвязи между климат ом и рост ом деревь е в. *Glob Change Biol gcb.* 15057 <https://doi.org/10.1111/gcb.15057> .

Вуд, С.Н., 2017. Обобщенные аддит ивные модели: введение с Р. Чепменом и Холлом/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>.

Young, GHF, McCarroll, D., Loader, NJ, Gagen, MH, Kirchhefer, AJ, Demmler, JC, 2012. Изм енения в ат мосферной циркуляц ии и Аркти еское колебание, сохраненные в рамк ах реконст рукц ии лет нег о облачного пок рова северной Фенноск андии за т ысяч елет нюю линию. *Clim. Dyn.* 39, 495–507. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1246-3>.

Занг, К., Бюнд и Ф., 2015. Treeclim: пак ет R для численной к алибровки и зависимост ей прокси климат а. *Ecography* 38, 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>.