Journal of Siberian Federal University. Biology 2022 15(2): 244–263
~ ~ ~

DOI 10.17516/1997-1389-0385

УДК 574.2:58.08:58.056

Dendroclimatic Potential of Blue Intensity-Based Chronologies of Northern Fennoscandia Scots Pine

Arina A. Vyukhina and Marina A. Gurskaya*
Institute of Plant and Animal Ecology UB RAS
Ekaterinburg, Russian Federation

Received 04.03.2022, received in revised form 23.05.2022, accepted 22.06.2022

Abstract. Annual rings contain information about past climate changes. A promising climate proxy is the blue intensity index (BI) obtained from digital images of tree cores. The work is aimed at identifying a climate signal in the tree-ring chronologies and BI chronologies in the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the north of Fennoscandia (Northern Lapland and the plain part of Kola Peninsula), and comparing the potential of these chronologies for reconstructing climatic parameters. Chronologies based on two proxies (tree-ring width and BI), from 233 to 434 years each one, were developed at four dendrochronological sites that create a 500 km long profile from 68.13°N 19.44°E to 66.30°N 35.42°E covering entirely northern Fennoscandia. The dendroclimatic analysis has shown that the tree-ring width proxy contains a July temperature signal at all sites, while the BI chronologies capture a wider range, from June to August, with both periods increasing to July-August and April-August respectively at the easternmost site. Temperature contributed about 50 % to the variation of the annual ring widths in the generalized chronologies, and more than 70 % to the BI dynamics. Temperature reconstructions performed on both proxies were relevant, but more accurate results were obtained using the BI chronology. Within the twentieth century, the reconstructions by both proxies revealed periods with both underestimated and overestimated temperatures.

Keywords: blue intensity, Scots pine, tree-ring width, climatic factors, climate reconstruction, Fennoscandia.

Acknowledgements. This work was partially supported by RFBR grant (№ 20-05-00569a), INTERACT TA TREENE, and the state program № FUWU-2022-0004. The authors are cordially grateful to Dr. L. I. Agafonov and M. O. Bubnov for their help in collecting and preparing samples.

© Siberian Federal University. All rights reserved
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).
* Corresponding author E-mail address: marina_gurskaya@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4420-4665 (Vyukhina A.); 0000-0001-5815-7228 (Gurskaya M.)

Citation: Vyukhina A. A., Gurskaya M. A. Dendroclimatic potential of blue intensity-based chronologies of northern Fennoscandia Scots pine. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(2), 244–263. DOI: 10.17516/1997-1389-0385

Интенсивность отражения синего (blue intensity): дендроклиматический потенциал сосны, произрастающей на севере Фенноскандии

А. А. Вьюхина, М. А. Гурская
Институт экологии растений и животных УрО РАН
Российская Федерация, Екатеринбург

Аннотация. Климатический сигнал в годичных кольцах содержит информацию о динамике климата в прошлом. Один из новых современных и перспективных подходов в изучении климатического сигнала – это анализ на цифровых изображениях кернов деревьев интенсивности отражения синего света (BI). Работа выполнена с целью выявить климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях по ширине годичного кольца и по BI у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на территории Северной Лапландии и равнинной части Кольского полуострова (на севере Фенноскандии), и провести сравнительный анализ потенциала хронологий для реконструкций климатических параметров. В работе использованы четыре дендрохронологических тест-полигона, создающих профиль протяженностью 500 км от 68°07′ с.ш. 19°26′ в.д. до 66°18′ с.ш. 35°25′в.д., охватывающий полностью север Фенноскандии, для них построены древесно-кольцевые хронологии по ширине кольца и по BI длительностью от 233 до 434 лет каждая. Дендроклиматический анализ показал, что ширина годичных колец сосны содержит сигнал температуры июля на всех тест-полигонах, а хронологии по BI захватывают более широкий диапазон с июня до августа с увеличением обоих периодов на самой восточной точке до июля-августа и апреля-августа соответственно. Температура июля вносит около 50 % в изменчивость ширины годичного кольца в генерализированных хронологиях, а температура июня-августа – более 70 % в динамику BI. Реконструкции температуры можно выполнять по обоим параметрам, но при использовании BI реконструкции температуры июня-августа точнее. В обеих реконструкциях, выполненных для XX века, выявлены периоды как с недооценкой, так и с переоценкой фактической температуры.

Ключевые слова: интенсивность отражения синего (blue intensity), сосна обыкновенная, ширина годичных колец, климатические факторы, реконструкции климата, Фенноскандия.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (№ 20-05-00569а), INTERACT TA TREENE, частичной поддержке государственной программы № FUWU-2022-0004. Авторы благодарны д.б.н. Л. И. Агафонову и М. О. Бубнову за помощь в сборе и подготовке образцов.

Цитирование: Вьюхина, А. А. Интенсивность отражения синего (blue intensity): дендроклиматический потенциал сосны, произрастающей на севере Фенноскандии / А. А. Вьюхина, М. А. Гурская // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 244–263. DOI: 10.17516/1997-1389-0385

Введение

Различные параметры годичных колец являются признанными источниками информации о климате прошлого благодаря их чувствительности к условиям окружающей среды (Briffa et al., 2001; McCarroll et al., 2003; Esper et al., 2012; Zhang et al., 2016; Fuentes et al., 2018). Для реконструкции климатических условий и экстремальных природных явлений прошлого используются такие параметры годичных колец, как ширина, максимальная плотность древесины, анатомические характеристики клеток, аномальные структуры, изотопный и химический состав колец (Гурская, Агафонов, 2013; Briffa et al., 1990; Lipp et al., 1991; Gagen et al., 2008; Bräuning et al., 2016; Gurskaya et al., 2012a, b; Gurskaya, 2017; Björklund et al., 2019, 2020; Binda et al., 2021; Churakova Sidorova et al., 2021). В условиях меняющегося климата поиск новых параметров, позволяющих получить более детальную информацию о периоде роста и формирования годичных колец, становится актуальным.

За последние десятилетия хронологии, основанные на данных о максимальной плотности поздней древесины, успешно были использованы для оценки изменчивости температуры в прошлом (Gunnarson et al., 2011; Melvin et al., 2013; Gurskaya et al., 2018; Björklund et al., 2019 и др.). Максимальная плотность поздней древесины хвойных деревьев более чувствительна к температурным колебаниям по сравнению с шириной годичных колец деревьев. Однако радиографический метод, используемый для выявления динамики плотности древесины, дорогостоящий и требует много времени и усилий при подготовке и обработке образцов (Campbell et al., 2007).

Доступной альтернативой максимальной плотности является новый и перспективный параметр годичных колец – интенсивность отражения синего света, или Blue intensity (BI). Перспективность использования BI в качестве дендроклиматического индикатора подтверждена многочисленными исследованиями (Campbell et al., 2007; Rydval et al., 2014; Björklund et al., 2015; Frank, Nikolussi, 2020; Nagavciuc et al., 2019; Wang et al., 2020 a, b; и др.). BI представляет собой интенсивность отражения синего света от тщательно подготовленных деревянных поверхностей. Одна из основных причин изменчивости интенсивности отражения синего света – зависимость данного параметра от количества лигнина в клеточных стенках поздней древесины (Wilson et al., 2017; Blake et al., 2020; Tsvetanov et al., 2020).

Чаще всего BI определяют для поздней древесины, где толщина клеточных стенок, а следовательно, и содержание лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы выше всего в годичном кольце, и используют для реконструкций региональных температур (Dolgova, 2016; Buckley et al., 2018; Heeter et al., 2019; Wilson et al., 2019; Parfitt et al., 2020; Reid, Wilson, 2020), для датирования археологической древесины (Wilson et al., 2017; Myglan et al., 2018), а также успешно применяют для создания длинных хронологий (Fuentes et al., 2018). Часто для калибровки BI с климатическими данными требуется меньше деревьев, чем по ширине годичного кольца (Seftigen et al., 2020).

Фенноскандия – это регион, включающий в себя Скандинавский полуостров, Финляндию, Кольский полуостров и Карелию, а к северу Фенноскандии относят Северную Лапландию и Кольский полуостров (Linderholm et

al., 2010). На территории Северной Фенноскадии выполнена пространственно-временная реконструкция летних температур на основе хронологий по ширине годичного кольца и BI за последние 1200 лет (Linderholm et al., 2010, 2015; McCarroll et al., 2013). Однако имеющиеся публикации посвящены в основном территории Северной Лапландии и горной части Кольского полуострова (Хибины), а равнинная часть Кольского полуострова часто остается вне поля зрения исследователей. Кроме этого, хотя все эти районы находятся за Полярным кругом в субарктической зоне, они характеризуются различными климатическими условиями, которые могут быть отражены в годичных кольцах.

Целью работы было (i) построить хронологии по ширине годичного кольца и по BI для территории Северной Лапландии и равнинной части Кольского полуострова, (ii) сравнить их потенциал для реконструкций климатических параметров, (iii) выполнить реконструкции, охватывающие полностью север Фенноскандии и (iv) провести сравнение с выполненными ранее реконструкциями в районе исследования.

Район, материал и методы исследования

Работа выполнена на северном пределе распространения сосны, произрастающей в Северной Лапландии и на Кольском полуострове. Здесь в субарктической зоне формируются северные сосновые леса и редколесья, а в тундровой части встречаются островки леса. Было выбрано четыре местообитания: 1 – окрестности г. Абиску, Швеция (68°13′с.ш. 19°44′в.д., 370 м над ур.м.); 2 – окрестности субарктической биологической станции Кево, Финляндия (69°54′с.ш. 26°42′в.д., 230 м над ур.м.); 3 – окрестности г. Кандалакша, Кольский полуостров (67°09′с.ш. 32°24′в.д., 170 м над ур.м.); 4 – окрестности пос. Умба, Кольский полуостров (66°30′с.ш. 35°42′в.д., 20 м над ур.м.). Выбранные точки характеризуются нормальным режимом влажности почвы и формируют широтный профиль протяженностью 500 км, который отражает изменение условий произрастания северных сосновых лесов в регионе от западных горных до восточных равнинных (рис. 1). На каждой точке в течение полевых сезонов 2018–2020 гг. были собраны образцы древесины (керны) с 20 деревьев на высоте ствола 0,5 м.

В лабораторных условиях была проведена экстракция смолы из образцов в аппарате Сокслета 96 %-ным этанолом в течение одной недели (24 ч активной экстракции). Керны после экстракции смолы были наклеены на деревянную подложку с помощью термопластичного клея и зачищены на микротоме. Для повышения контрастности годичных колец зачищенная поверхность была натерта белым мелом. Излишки мела были убраны смоченной в воде материей для того, чтобы избежать искажения интенсивности отражения синего при расшифровке цифрового изображения (Österreicher et al., 2015; Kaczka et al., 2018).

Сканирование кернов было выполнено с использованием планшетного сканера Epson Perfection V550 Photo с разрешением 3200dpi в программе SilverFast AI8. Перед сканированием была проведена калибровка сканера с использованием отражающей мишени Monaco System (MONR 2014:08–02). Полученные цветные цифровые изображения были расшифрованы с использованием программы CooRecorder 8.1 (Larsson, 2013), в которой были определены ширина годичного кольца и BI. Так как у сосны переход между ядром и заболонью не резкий, то использовали прямые оценки BI, а не delta BI. Для датировки каждой серии ширины годичных колец была использована программа TSAP-Win (Rinn,

Рис. 1. Район исследования. 1, 2, 3, 4 [●] – точки сбора образцов. «*» метеостанция. Черная рамка – район, используемый для получения данных по CRU 4.04

Fig. 1. Study area. 1, 2, 3, 4 [●] – sampling sites. "*" – weather station. The rectangular area is CRU 4.04 data area

2003), а качество датировки оценивалось в программе COFECHA (Holmes, 1983). После установления календарной даты формирования колец на исходном сканированном изображении определяли BI.

Основываясь на качестве полученных сканированных изображений и результатов оценки BI, в дальнейший анализ включили по 12–15 образцов древесины с каждой точки. Остальные образцы либо были слишком короткими (содержали менее 100 годичных колец), либо качество изображения было низким, нечетким.

Возрастной тренд в индивидуальных сериях как по ширине кольца, так и по BI удалялся путем детрендинга скользящим кубическим сплайном в 2/3 длины каждой серии в программе ARSTAN (Cook, Krusic, 2008). Для анализа были использованы остаточные хронологии – стандартизированные обобщенные хронологии, не имеющие автокорреляционной составляющей. Качество построенных хронологий оценивалось на основе традиционных в дендрохронологии показателей: выпавших колец, средних и максимальных значений ширины кольца и BI, коэффициентов корреляции, чувствительности, а для индексированных хронологий также использовались EPS (Expressed Population Signal, выраженность популяционного сигнала), Rbar – коэффициент межсерийной корреляции, AC – автокорреляция, SD – стандартное отклонение (Wigley et al., 1984; Briffa, Jones, 1990). По результатам статистического анализа индивидуальных серий в дендроклиматический анализ были отобраны образцы, имеющие наибольшие значения коэффициентов корреляции с мастер-хронологией. Генерализация полученных индексированных хронологий в региональную хронологию по ширине годичного кольца и по BI была выполнена методом взвешенной средней.

Для оценки климатических условий района исследования и выявления связей с климатическими переменными каждой точечной хронологии были использованы данные прямых наблюдений на метеостанциях по средней месячной температуре и осадкам за периоды наблюдений (с 1936 по 2018 г.) по станциям Абиску (68°35′с.ш.

18°83′в.д., 394 м над ур.м.), Кево (69°45′с.ш. 27°01′в.д., 101 м над ур.м.), Кандалакша (67°09′с.ш. 32°41′в.д., 29 м над ур.м.) и Умба (66°41′с.ш. 34°21′в.д., 39 м над ур.м.). Для выявления климатического общего сигнала в генерализованных хронологиях были использованы данные с интернет-ресурса Королевского метеорологического института Нидерландов (CRU 4.04, http://climexp.knmi.nl) за период 1901–2019 гг. для района между 66°18′ – 69°48′ с.ш. 19°26′ – 35°25′ в.д. Анализ климатического отклика хронологий был проведен в программе Dendroclim2002 (Biondi, Waikul, 2004) с использованием метода скользящего окна размером 40 лет с движением вперед и с шагом в один год. Учитывая, что сосна обладает долгоживущей хвоей, для расчетов климатического отклика был использован не один биологический год, а два года: с мая предшествующего по сентябрь текущего. Для дендроклиматических реконструкций применена линейная регрессия, процедуру калибровки и верификации проводили с использованием пакета дендрохронологических программ DPL (Fritts, 1976).

Результаты

Климатические условия района исследования

Район исследования расположен в южной лесотундре субарктической зоны Северной Лапландии и Кольского полуострова. В целом, динамика климатических параметров почти одна и та же на всех точках. Зимой отмечены отрицательные температуры, самый холодный месяц – январь, а летом самый теплый месяц – июль. Наибольшее количество осадков приходится на летний (вегетационный) период, достигая максимума в июле или в августе (рис. 2).

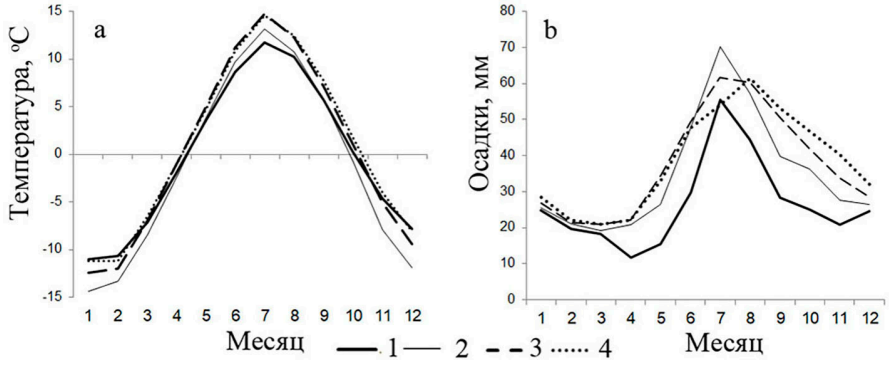

Рис. 2. Климатические условия района исследования: a – сравнение годового хода температуры; b – сравнение динамики осадков: 1, 2, 3, 4 – точки сбора образцов

Fig. 2. Climatic conditions of the sampling sites. a – annual temperature, b – precipitation; 1, 2, 3, 4 – sampling sites

На точках 1 и 2 средняя годовая температура ниже 0 °C (минус 0,26 °C и минус 1,35 °C соответственно), а на точках 3 и 4 немного выше 0 °C (0,37 °C и 0,82 °C соответственно). Среднее годовое количество осадков минимально на точке 1 (320 мм) и примерно одинаково на остальных (420–460 мм). Самым теплым месяцем года является июль со средней месячной температурой 11,6 °C на точке 1, а максимально теплый июль отмечен на точке 3 – 14,7 °C. Самый холодный месяц – январь, температура в этот месяц изменяется от ми-

нус 11 °C (точка 1) до минус 14 °C (точка 2). Максимальная разница между температурами июля-января отмечена на самой северной точке 2, а минимальная разница – на точке 1. Максимум осадков в течение года смещается с июля на западе на август на востоке профиля (рис. 2).

Древесно-кольцевые хронологии

Длина полученных сырых хронологий по ширине годичного кольца варьирует от 231 до 434 лет (табл. 1). При датировке были выявлены выпадающие кольца, их наибольшее количество было отмечено на точке 2. Ширина годичных колец и их корреляция с мастер-хронологией убывают с запада на восток. Наиболее широкие кольца и тесная корреляция между сериями отмечены на точке 1. Коэффициент чувствительности всех серий низкий и колеблется около 0,2.

Хронологии по BI имеют такую же протяженность, как и по ширине годичного кольца. Корреляция индивидуальных серий с мастер-хронологией не имеет выраженного тренда с запада на восток. Средние значения интенсивности отражения синего колеблются около 1, чувствительность серий оказалась очень низкой (табл. 1).

Коэффициенты кросс-корреляции остаточных хронологий, рассчитанные за общий период, достаточно высокие и закономерно убывают с увеличением расстояния между точками (табл. 2). Наименьшие значения коэффициентов корреляции получены для хро-

Таблица 1. Статистические характеристики неиндексированных древесно-кольцевых хронологий по ширине годичного кольца и по BI

Table 1. Statistical characteristics of raw tree-ring width and BI chronologies

Точка	Число образцов	Период	Длина, лет	Выпавшие, %	Ширина годичного кольца				BI годичного кольца			
					Rbar	Средняя, мм	Максимальная, мм	Чувствительность	Rbar	Средняя	Максимальная	Чувствительность
1	12	1786–2018	233	0,045	0,71	1,00	2,35	0,214	0,64	1,06	1,58	0,086
2	14	1787–2017	231	0,292	0,65	0,68	3,15	0,232	0,62	1,23	1,84	0,094
3	15	1596–2019	424	0,163	0,63	0,63	2,72	0,213	0,62	1,14	2,24	0,085
4	12	1586–2019	434	0,083	0,58	0,50	2,66	0,204	0,64	1,15	1,77	0,079

Таблица 2. Кросс-корреляционная матрица между индексированными хронологиями, общий период 1784–2018 гг.

Table 2. Cross-correlation matrix of residual chronologies for the period 1784–2018

Ширина годичного кольца					Интенсивность отражения синего				
Точки	**1**	**2**	**3**	**4**	Точки	**1**	**2**	**3**	**4**
1	1	-	-	-	**1**	1	-	-	-
2	0,55	1	-	-	**2**	0,63	1	-	-
3	0,43	0,50	1	-	**3**	0,50	0,61	1	-
4	0,31	0,42	0,58	1	**4**	0,32	0,46	0,50	1

нологий на точках 1 и 4. Несмотря на это, коэффициенты корреляции между далеко расположенными хронологиями остаются достаточно высокими (r=0,3, N=230, *p-level*<0,05). В большинстве случаев кросс-корреляция между хронологиями по BI несколько выше, чем по ширине годичного кольца (за исключением коэффициента корреляции между точками 3 и 4). Корреляция между индексами радиального прироста и BI на каждой точке составила 0,30, 0,39, 0,25, 0,36 соответственно.

Согласно статистическим характеристикам индексированных хронологий, все использованные в анализе серии хорошо согласуются между собой, коэффициент корреляции выше 0,4, стандартное отклонение не превышает 0,2, что также указывает на однородность полученных индексов, а значения автокорреляции стремятся к нулю, что исключает влияние предыдущего года на формирование колец в текущем году. Общий период с EPS> 0,85 для всех хронологий отмечен с 1840 г., а для точек 3 и 4 – с 1621 г. (табл. 3).

Во всех индексированных хронологиях выделяются периоды с низкими значениями индексов, приуроченные чаще к XIX столетию, и с высокими значениями, чаще отмечаемыми в середине XX в. Последний период с низкими значениями индексов отмечен в конце XX в., а именно в период 1970–2010 гг. (табл. 4). В последнее десятилетие индексы ширины годичного кольца и BI колеблются возле средних многолетних значений (рис. 3 и 4).

Результаты анализа климатического отклика показали, что все хронологии содержат устойчивый сигнал температуры летних месяцев текущего года. В частности, ширина годичного кольца у всех хронологий имеет положительные связи с июлем, а при движении на восток на точке 4 отмечены устойчивые корреляции с температурой августа (рис. 5). Положительные, но не стабильные связи с осадками марта выявлены на точке 2.

Хронологии по BI имеют устойчивые связи с бóльшим количеством месяцев на всех точках. Однако, как и в случае с шириной годичного кольца, количество месяцев, имеющих устойчивую положительную связь с температурой, увеличивается по направлению к точке 4. На точке 1 это стабильные связи с июлем-августом и нестабильные с июнем, а на точке 4 стабильные связи характерны для периода апрель-август. С осадками отрицательные связи отмечены на точке 2 в июне и на точке 3 в августе. На остальных точках связей с осадками не выявлено.

Таблица 3. Средние значения статистических характеристик индексированных хронологий. Rbar – коэффициент корреляции, SD – стандартное отклонение, AC – коэффициент автокорреляции, EPS – выраженность популяционного сигнала

Table 3. Statistical characteristics of residual chronologies. Rbar – correlation coefficient, SD – standard deviation, AC – autocorrelation coefficient, EPS – expressed population signal

Точка	Ширина годичного кольца					Интенсивность отражения синего				
	Rbar	SD	AC	EPS	Год, с которого EPS>0,85	Rbar	SD	AC	EPS	Год, с которого EPS>0,85
1	0,58	0,17	0,06	0,93	1840	0,43	0,21	0,03	0,87	1840
2	0,46	0,17	0,00	0,88	1840	0,48	0,20	0,00	0,90	1840
3	0,55	0,17	0,00	0,91	1621	0,49	0,20	0,00	0,87	1621
4	0,44	0,19	0,00	0,87	1611	0,43	0,20	0,00	0,89	1611

Таблица 4. Три первых периода с минимальным/максимальным приростом и BI в ранжированном ряду, построенном на основе сглаженных значений индексов на общей части хронологий с 1830 по 2018 г. Ранги: 1 – самые низкие/высокие значения и далее по увеличению/уменьшению значений соответственно

Table 4. The first three periods with minimum/maximum tree-ring widths and BIs ranked by smoothed index values on the common part of the chronologies for 1830–2018. Ranks: 1 – the lowest/highest values, further values increase/decrease, respectively

Точка	Индексы ширины годичного кольца				Индексы BI			
	Мини-мальный	ранг	Макси-мальный	ранг	Мини-мальные	ранг	Макси-мальные	ранг
1	1833–1841 1898–1913 1978–1997	1 2 3	1842–1855 1919–1947 1997–2004	1 2 3	1825–1841 1885–1894 1958–1969	1 2 3	1841–1848 1931–1941 2002–2009	1 2 3
2	1830–1843 1876–1895 1899–1917	2 3 1	1843–1865 1917–1935 1990–2007	2 1 3	1827–1843 1897–1915 1960–1970	2 1 3	1843–1889 1916–1948 1970–1977	1 2 3
3	1850–1868 1900–1913 1925–1944	3 2 1	1894–1899 1945–1960 1996–006	3 1 2	1830–1840 1862–1893 1897–1912	2 3 1	1840–1861 1925–1961 1985–1992	1 2 3
4	1834–1840 1887–1903 1976–2009	1 2 3	1850–1856 1870–1887 1914–1934	1 3 2	1834–1840 1868–1875 1976–2003	1 2 3	1848–1857 1913–1934 1971–1976	1 2 3

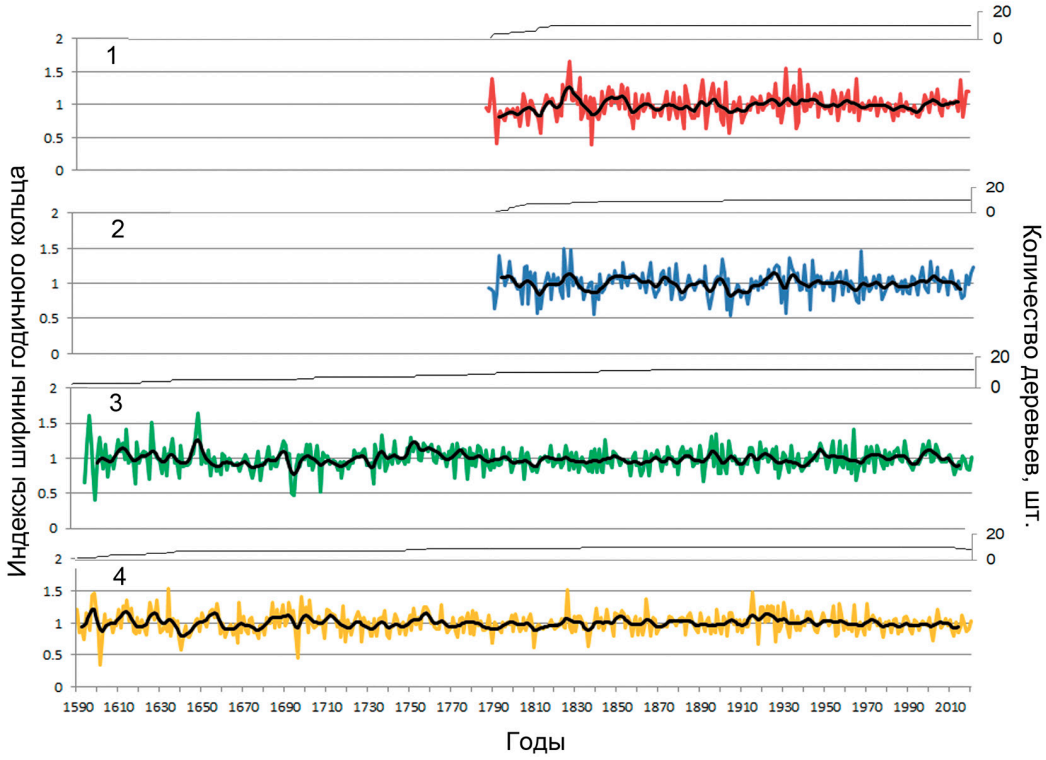

Рис. 3. Индексированные хронологии по ширине годичных колец и количество деревьев, использованных для создания хронологий. 1, 2, 3, 4 – точки сбора образцов. Черная жирная линия – 11-летнее сглаженное среднее

Fig. 3. Tree-ring width residual chronologies and number of trees used for building chronologies. 1, 2, 3, 4 – sampling sites; the black thick line – the 11-year smoothed mean

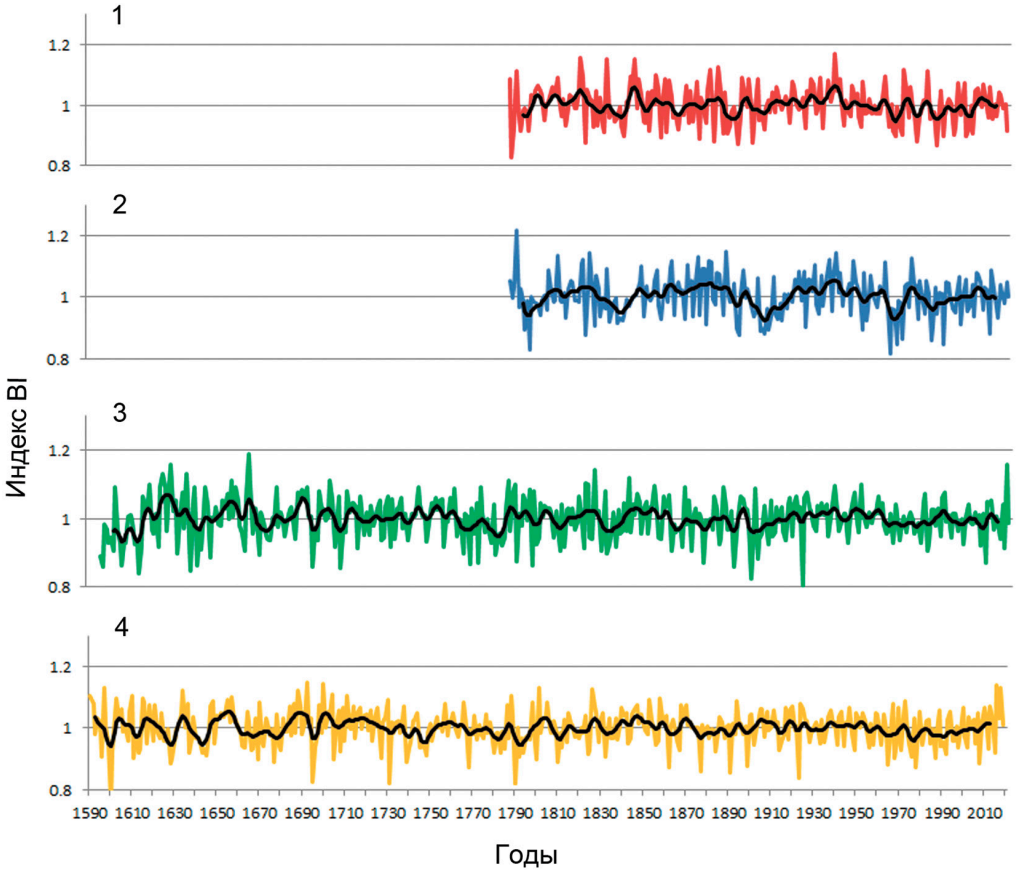

Рис. 4. Индексированные хронологии по BI. 1, 2, 3, 4 – точки сбора образцов. Черная жирная линия – 11-летнее сглаженное среднее

Fig. 4. BI residual chronologies. 1, 2, 3, 4 – sampling sites. The black thick line – the 11-year smoothed mean

Основываясь на сходном характере связей между хронологиями и климатическими факторами на всей территории, хронологии мы объединили взвешенным арифметическим усреднением в генерализованные хронологии по ширине кольца и по BI, для которых были определены коэффициенты корреляции с температурными условиями в этом регионе. Наиболее тесные связи между шириной годичного кольца и температурой получены для июля текущего года, по BI – за период с июня по август (рис. 6). Полученные связи оказались теснее и более четко выраженные, чем на отдельно взятых точках. Температура июля описывает 52 % (SD=1,13) от общей изменчивости ширины годичного кольца полученной хронологии, а температура июня-августа определяет 71 % изменчивости индексов BI (SD=0,72).

На основе полученных связей была проведена реконструкция температуры июля по ширине годичного кольца и июня-августа по BI (Fritts, 1976). Результаты калибровки и верификации показали, что предложенная линейная модель связей ширины годичного кольца и температуры воздуха имеет до 76 % положительных совпадений реконструированных данных с инструментальными наблюдениями (табл. 5). Реконструкции, основанные на хронологии по BI, оказались гораздо более

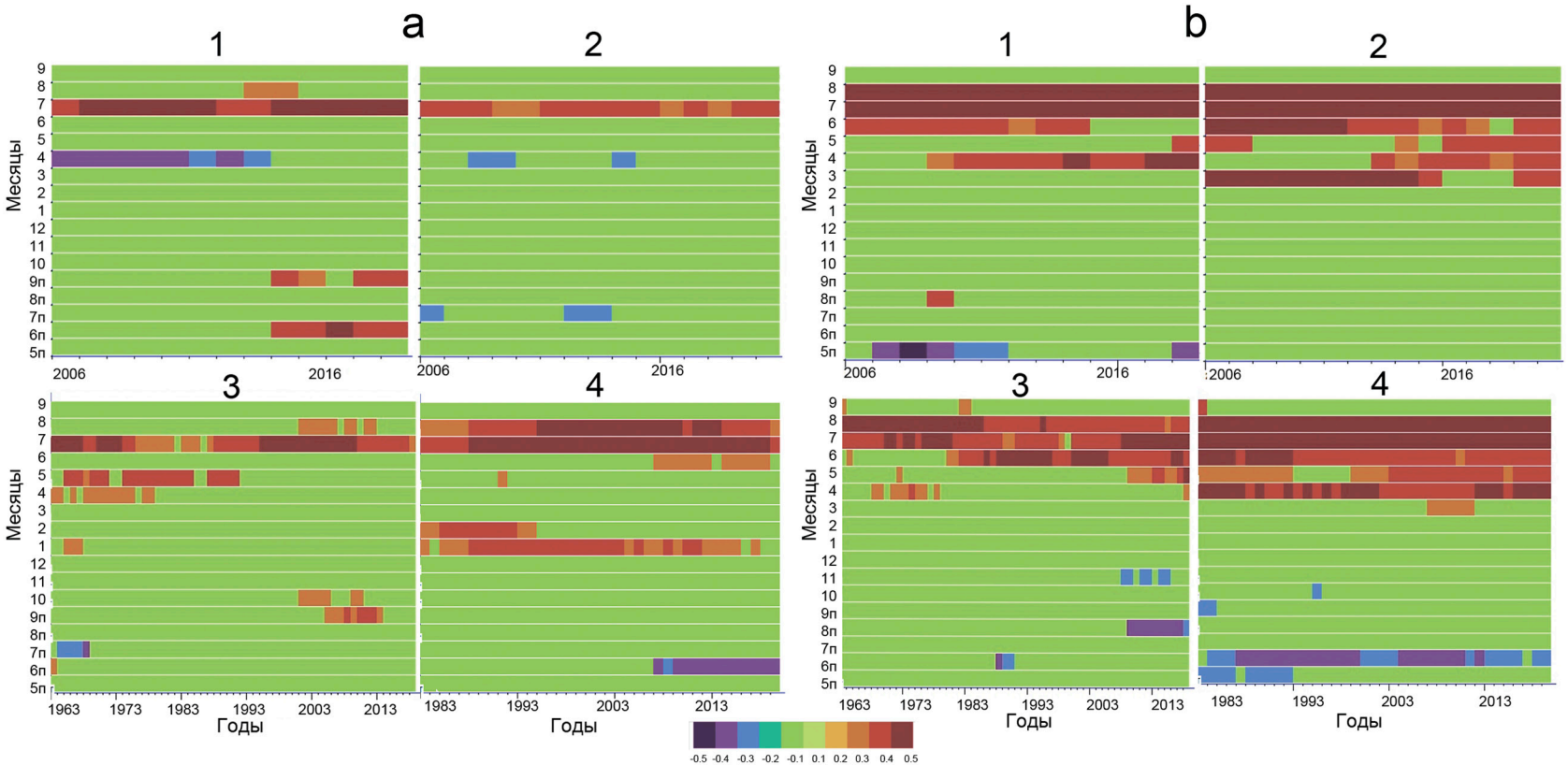

Рис. 5. Коэффициенты корреляции между индексами ширины годичного кольца (a), BI (b) и температуры воздуха по данным близлежащих метеостанций, рассчитанные методом скользящего окна размером 40 лет, с шагом в один год. «п» – месяцы предшествующего года. 1, 2, 3, 4 – точки сбора образцов. Оттенки зеленого – незначимые коэффициенты корреляции

Fig. 5. Correlation coefficients between tree-ring width (a), BI (b) and air temperature calculated using moving average method with a 40-year window and one-year step. “п” – months of previous year; 1, 2, 3, 4 – sampling sites. Green colored areas correspond with insignificant correlation coefficients

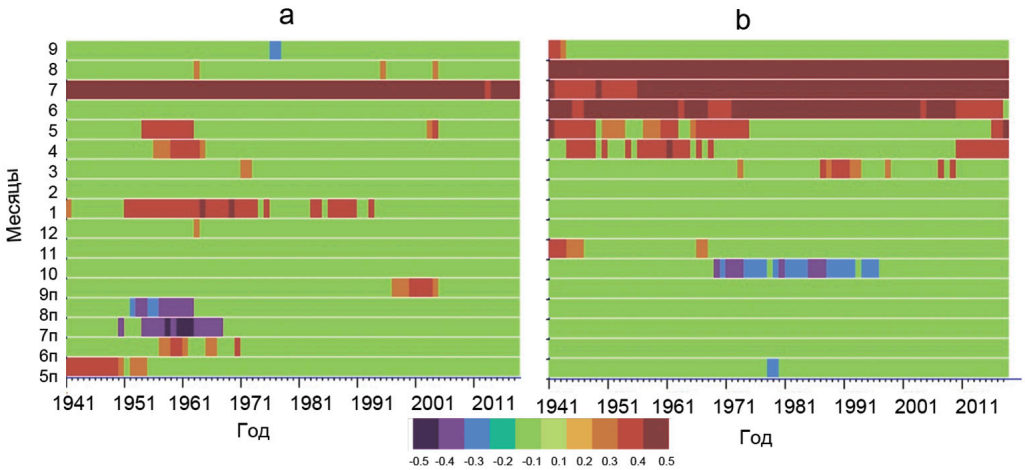

Рис. 6. Коэффициенты корреляции между индексами генерализированных хронологий ширины годичного кольца (a), BI (b) и температуры воздуха (CRU 4.04) методом скользящего окна размером 40 лет, с шагом в один год. «п» – месяцы предшествующего года. Оттенки зеленого – незначимые коэффициенты корреляции

Fig. 6. Correlations coefficients between generalized chronologies of tree-ring widths (a), BI (b), and air temperature (CRU 4.04), moving window method, with a 40-year window and one-year step. “п” – months of previous year. Green colored areas correspond with insignificant correlation coefficients

Таблица 5. Калибровка и верификация реконструированных данных. R^2 – коэффициент множественной детерминации, *r* – коэффициент корреляции Пирсона, RE – коэффициент уменьшения ошибки, CE – коэффициент эффективности, t-test – тест Стьюдента; «+»/ «-» – число совпадений /расхождений (тест знаков). Positive, % –процент совпадений синхронных увеличений и снижений реконструированных данных с фактическими наблюдениями

Table 5. Calibration and verification of reconstructed data. R^2 – coefficient of determination, *r* – Pearson correlation coefficient, RE – reduction of error, CE – coefficient of efficiency, t-test – Student’s test; “+” / “-” – the number of matches/diversions (sign test). Positive, % – percentage of synchronous changes in reconstructed data with actual observations

Параметр	Оценка	Период	R^2	*r*	RE	CE	t-test	«+»/ «-»	positive, %
Ширина годичного кольца	Калибровка	1901–1950	0,74	0,86	0,74	0,64	1,2	34+/16-	68 %
	Верификация	1951–2018	0,46	0,48	0,28	0,26	3,5	51+/17-	75 %
	Калибровка	1951–2018	0,46	0,48	0,21	0,26	2,2	52+/16-	76 %
	Верификация	1901–1950	0,74	0,86	0,74	0,64	1,2	34+/16-	68 %
BI	Калибровка	1901–1950	0,88	0,94	0,86	0,76	1,2	36+/14-	72 %
	Верификация	1951–2018	0,53	0,73	0,63	0,53	6,1	51+/17-	79 %
	Калибровка	1951–2018	0,53	0,73	0,47	0,53	1,2	54+/14-	79 %
	Верификация	1901–1950	0,88	0,94	0,87	0,76	1,2	42+/8-	72 %

точными и имели до 79 % совпадений с инструментальными данными. Коэффициент уменьшения ошибки (RE) остается положительным и уменьшается в период 1950–2018 гг., что также указывает на хорошее качество предложенной модели (Fritts, 1976).

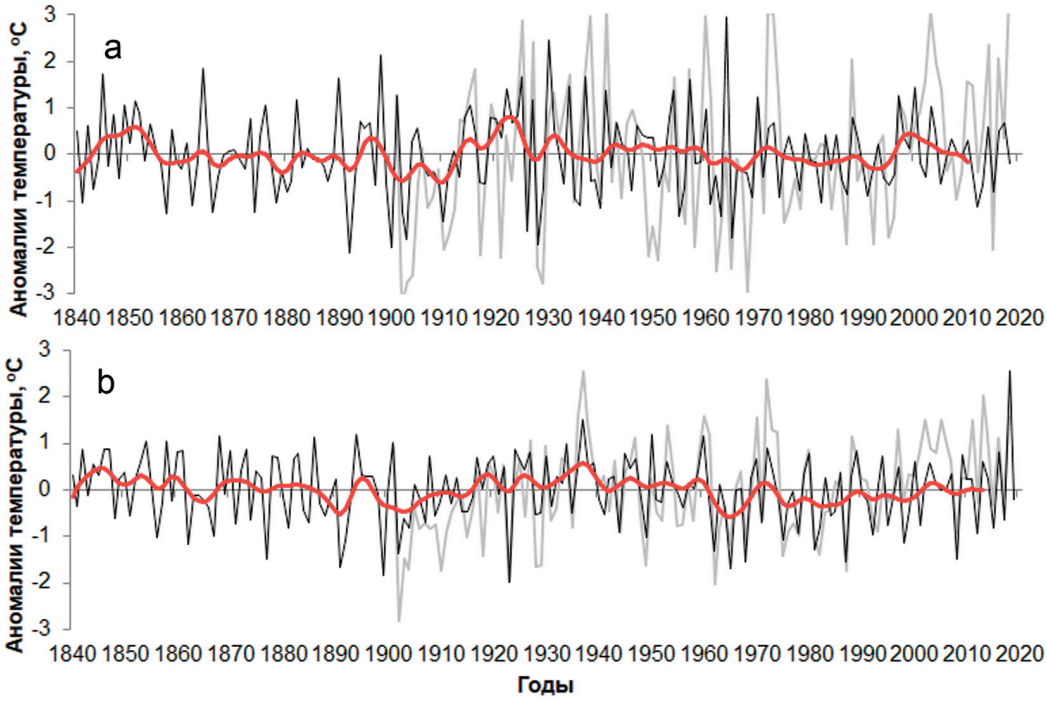

Рис. 7. Реконструкции аномалий температуры воздуха (черная линия) июля по хронологии ширины годичных колец (a) и июня-августа по хронологии по BI (b), сглаженные 11-летним фильтром значения (красная линия) и сравнение с инструментальными наблюдениями (серая линия)

Fig. 7. Reconstruction of air temperature anomalies (black line) in July by tree-ring width chronology (a) and in June-August by BI chronology (b); the red and gray lines for the 11-year smoothed means and direct instrumental measurements, respectively

Полученные статистически достоверные коэффициенты линейной регрессии позволили рассчитать значения температуры за общий период 1840–2019 гг. После этого были определены аномалии температуры относительно периода 1901–2018 (на основании данных CRU 4.04) и проведено сравнение аномалий температуры реконструированных данных и инструментальных наблюдений (рис. 7).

Обсуждение результатов

Климатические условия района исследования имеют как общие черты, характерные для субарктического региона (низкая средняя годовая температура, прохладное лето), так и региональные особенности в виде усиления влияния морского климата на точках 3 и 4, расположенных в непосредственной близости от Белого моря и Кандалакшского залива. Кроме этого, в регионе существует сильное влияние севера Атлантического океана, несколько ограниченное Скандинавским хребтом, что проявляется в уменьшении количества осадков на точке 1.

Сосна формирует здесь северную границу распространения хвойных деревьев. На точках 1 и 2 произрастают самые северные островные леса Северной Лапландии, а на точках 3 и 4 ограничением продвижения на север выступают болотистые условия Кольского полуострова. На заболоченных местообитаниях сосна продолжает формировать лесные массивы далее на север, но они

значительно уступают свежим местообитаниям по качеству климатического сигнала, содержащемуся в годичных кольцах (Speer, 2010; Schweingruber, 1996, 2012).

Длина хронологий, полученных по живым деревьям, оказалась более 400 лет на точках 3 и 4, что указывает на отсутствие каких-либо катастрофических природных воздействий, таких как крупные лесные пожары, вспышки насекомых-вредителей и слабую или разумную антропогенную нагрузку, что позволило лесам существовать достаточно длительное время. На точках 1 и 2 существующие лесные массивы появились значительно позднее (около 230 лет назад).

Принимая во внимание высокие значения коэффициентов корреляции между индивидуальными сериями и полученными обобщенными хронологиями на всех точках, можно предположить, что существует общий внешний фактор (скорее всего климатический), который хорошо выражен в годичных кольцах как в ширине, так в значениях отражения синего света. Использование для реконструкции нескольких разделенных между собой местообитаний способствует более качественной реконструкции, позволяя избегать влияния локальных условий произрастания.

Климатический анализ показал, что несмотря на то, что в июне средняя месячная температура достигает 10 °C, температура этого месяца не влияет на ширину годичного кольца сосны. Связи между шириной годичного кольца сосны, произрастающей на территории северной Лапландии, и температурой июля и отсутствие связей с температурой июня были отмечены в различных исследованиях (Mikola, 1956; Linderholm et al., 2010, 2015; McCarrol et al., 2013). На самой восточной части профиля отмечается влияние не только июля, но и августа, что связано с более продолжительным вегетационным сезоном из-за смягчающего влияния Белого моря и некоторого уменьшения широты (самое южное положение точки). Связи ширины годичного кольца с осадками имеют спорадический характер и определяются местными условиями произрастания или являются случайными.

Хронологии по BI с продвижением на восток также характеризуются увеличением количества месяцев, влияющих на интенсивность BI, что также обусловлено как более южным положением точек 3 и 4, так и влиянием Белого моря на температурные условия региона. В результате построения генерализированной хронологии по BI общими месяцами, влияющими на динамику BI, остаются июнь-август (McCarrol et al., 2013; Björklund et al., 2014; Linderholm et al., 2015).

В целом по результатам калибровки и последующей верификации полученные реконструкции соответствуют инструментальным наблюдениям, следовательно, хронологии как по ширине годичного кольца, так и по BI могут быть использованы для реконструкции температуры в прошлом.

Отличия от инструментальных наблюдений отмечены в период 1901–1910, 1920–1930 и 1950–1955 гг., когда фактические температуры были существенно ниже, и в период 1970–1975 и 2005–2015 гг., когда фактические температуры были существенно выше. Реконструкции по BI существенно точнее, но и здесь отмечена недооценка температуры в период 1901–1920 гг. и переоценка в 2000–2010.

Вероятно, расхождение в оценке обусловлено удалением среднепериодной изменчивости в остаточных хронологиях. Кроме этого, недооценка температуры в начале XX в. может быть связана с длительностью рядов фактических инструментальных наблюдений в регионе, которые в действительности ко-

роче по сравнению с использованными данными CRU 4.04. Так как метеорологические станции в районе исследования появились после 1930 г., не исключена статистическая погрешность в реконструкциях в начальный период. У деревьев отмечено снижение прироста в период 1900–1930 гг. на разных точках, но оно не столь существенно, как показывают данные по температуре Climate Explorer.

В последние десятилетия, когда наблюдается значительный рост температуры в высоких широтах (IPCC, 2014), ширина годичных колец и индексы BI существенно не увеличиваются на севере Фенноскандии; период с 2000–2018 гг. не является периодом с максимальным приростом ни на одной из точек. Несмотря на это, коэффициенты корреляции с температурой остаются достаточно высокими и стабильными.

Многие исследователи отмечают, что по дендроклиматическим реконструкциям температуры, основанным на ширине годичных колец, XX в. в районе исследования был в целом теплее по сравнению с предыдущим столетием (Grudd et al., 2002; Grudd, 2008; Melvin et al., 2013; Linderholm et al., 2015). В наших реконструкциях повышение температуры воздуха в XX в. менее выражено. Причиной этого может быть выбранный нами метод индексации. Кроме того, не исключены особенности профиля, использованного в этой работе, который длится существенно юго-восточнее по сравнению с предыдущими работами, или выбор температуры июля (а не всех трех летних месяцев) в качестве предиктора при разработке регрессионной модели. В конце XX в. отмечены отрицательные аномалии температуры, которые несколько компенсировались в XXI в. Реконструкции температуры июня-августа по BI, несмотря на очень большое сходство с инструментальными данными, также не показали выраженного повышения температуры в XX и XXI вв. по сравнению с XIX в. Более того, с учетом отмеченной нами переоценки реконструированной температуры в XXI в. по BI каких-либо выраженных аномалий температуры мы не выявили. Эти результаты несколько расходятся с данными по максимальной плотности и BI поздней древесины, сделанными для всего Скандинавского полуострова, за исключением восточной части Кольского полуострова (Björklund et al., 2014; Linderholm et al., 2015; Wilson et al., 2016; Fuentes et al., 2018). Однако следует отметить, что и инструментально наблюдаемые температуры несколько снижаются в этот период.

Заключение

Таким образом, у сосны, произрастающей на северном пределе распространения в Лапландии и на Кольском полуострове, выявлена статистически значимая положительная корреляция между древесно-кольцевыми хронологиями как по ширине, так и по интенсивности отражения синего по всему району исследования. Хронологии по ширине годичных колец характеризуются высокими и средними значениями статистических характеристик (синхронностью, коэффициентами корреляции и чувствительностью). В хронологиях по ширине годичного кольца температурный сигнал июля на западной части профиля расширяется до июля-августа в восточной части. Ширина годичного кольца имеет средний потенциал для реконструкции климатических условий прошлого по сравнению с BI, так как описывает 46–74 % изменчивости температуры.

Хронологии интенсивности отражения синего в годичном кольце характеризуются низкой чувствительностью, высокой синхронностью между сериями и хронологиями в регионе. Хронологии по BI имеют сильный

температурный сигнал июня-августа, а при движении на юго-восток климатическое сезонное «окно», влияющее на BI годичных колец, расширяется до апреля-августа. Хронологии по BI имеют высокий потенциал для улучшения существующих реконструкций и предоставляют фундаментальную информацию для углубления нашего понимания изменчивости климата в регионе.

Выполненные реконструкции температуры достаточно близко описывают имеющиеся температурные данные, основанные на инструментальных наблюдениях в районе исследования, переоценивая их в начале XX в. и несколько недооценивая в конце XX в., что может быть связано с удалением среднепериодной составляющей в хронологиях. Реконструкции не выявили существенного повышения температуры июля и июня-августа в районе исследования как в XX в. по сравнению с XIX в., так и в последние десятилетия.

Список литературы / References

Гурская М. А., Агафонов Л. И. (2013) Реконструкция коротких вегетационных сезонов на севере Западной Сибири по хронологиям светлых годичных колец деревьев. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 1: 42–53 [Gurskaya M. A., Agafonov L. I. (2013) Reconstruction of short vegetation Seasons at the north of western Siberia on chronology of circannual rings. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 1: 42–53 (in Russian)]

Binda G., Di Iorio A., Monticelli D. (2021) The what, how, why, and when of dendrochemistry: (paleo)environmental information from the chemical analysis of tree rings. *Science of the Total Environment*, 758: 143672

Biondi F., Waikul K. (2004) DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 30(3): 303–311

Björklund J., von Arx G., Nievergelt D., Wilson R., Van den Bulcke J., Günther B., Loader N. J., Rydval M., Fonti P., Scharnweber T., Andreu-Hayles L., Büntgen U., D'Arrigo R., Davi N., De Mil T., Esper J., Gärtner H., Geary J., Gunnarson B. E., Hartl C., Hevia A., Song H., Janecka K., Kaczka R. J., Kirdyanov A. V., Kochbeck M., Liu Y., Meko M., Mundo I., Nicolussi K., Oelkers R., Pichler T., Sánchez-Salguero R., Schneider L., Schweingruber F., Timonen M., Trouet V., Van Acker J., Verstege A., Villalba R., Wilmking M., Frank D. (2019) Scientific merits and analytical challenges of tree-ring densitometry. *Reviews of Geophysics*, 57(4): 1224–1264

Björklund J. A., Gunnarson B. E., Seftigen K., Esper J., Linderholm H. W. (2014) Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information. *Climate of the Past*, 10(2): 877–885

Björklund J., Gunnarson B. E., Seftigen K., Zhang P., Linderholm H. W. (2015) Using adjusted Blue Intensity data to attain high-quality summer temperature information: A case study from Central Scandinavia. *Holocene*, 25(3): 547–556

Björklund J., Seftigen K., Fonti P., Nievergelt D., von Arx G. (2020) Dendroclimatic potential of dendroanatomy in temperature-sensitive *Pinus sylvestris*. *Dendrochronologia*, 60: 125673

Blake S. A. P., Palmer J. G., Björklund J., Harper J. B., Turney C. S. M. (2020) Palaeoclimate potential of New Zealand *Manoao colensoi* (Silver pine) tree rings using Blue-Intensity (BI). *Dendrochronologia*, 60: 125664

Bräuning A., De Ridder M., Zafirov N., García-González I., Dimitrov D.P., Gärtner H. (2016) Tree-ring features: indicators of extreme event impacts. *IAWA Journal*, 37(2): 206–231

Briffa K.R., Jones P.D. (1990) Measuring the statistical quality of a chronology. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Cook E.R., Kairiukstis L.A. (Eds.) Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass., USA, p. 137–152

Briffa K.R., Bartholin T.S., Eckstein D., Jones P.D., Karlén W., Schweingruber F.H., Zetterberg P. (1990) A 1,400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature*, 346(6283): 434–439

Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. (2001) Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D 3): 2929–2941

Buckley B.M., Hansen K.G., Griffin K.L., Schmiege S., Oelkers R., D'Arrigo R.D., Stahle D.K., Davi N., Nguyen T.Q.T., Le C.N., Wilson R.J.S. (2018) Blue intensity from a tropical conifer's annual rings for climate reconstruction: An ecophysiological perspective. *Dendrochronologia*, 50: 10–22

Campbell R., McCarroll D., Loader N.J., Grudd H., Robertson I., Jalkanen R. (2007) Blue intensity in *Pinus sylvestris* tree-rings: developing a new palaeoclimate proxy. *Holocene*, 17(6): 821–828

Churakova Sidorova O.V., Siegwolf R.T.W., Fonti M.V., Vaganov E.A., Saurer M. (2021) Spring arctic oscillation as a trigger of summer drought in Siberian subarctic over the past 1494 years. *Scientific Reports*, 11(1): 19010

Cook E.R., Krusic P.J. (2008) *A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics (ARSTAN).* URL: http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/trl/public/publicSoftware.html

Dolgova E. (2016) June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data. *Dendrochronologia*, 39: 17–23

Esper J., Büntgen U., Timonen M., Frank D.C. (2012) Variability and extremes of northern Scandinavian summer temperatures over the past two millennia. *Global and Planetary Change*, 88–89: 1–9

Frank T., Nicolussi K. (2020) Testing different Earlywood/Latewood delimitations for the establishment of Blue Intensity data: A case study based on Alpine *Picea abies* samples. *Dendrochronologia*, 64: 125775

Fritts H. (1976) *Tree Rings and Climate.* New York, Academic Press, 567 p.

Fuentes M., Salo R., Björklund J., Seftigen K., Zhang P., Gunnarson B., Aravena J.-C., Linderholm H.W. (2018) A 970-year-long summer temperature reconstruction from Rogen, west-central Sweden, based on blue intensity from tree rings. *Holocene*, 28(2): 254–266

Gagen M., McCarroll D., Robertson I., Loader N.J., Jalkanen R. (2008) Do tree ring δ13C series from *Pinus sylvestris* in northern Fennoscandia contain long-term non-climatic trends? *Chemical Geology*, 252(1–2): 42–51

Grudd H., Briffa K.R., Karlén W., Bartholin T.S., Jones P.D., Kromer B. (2002) A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales. *Holocene*, 12(6): 657–665

Grudd H. (2008) Torneträsk tree-ring width and density AD 500–2004: a test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers. *Climate Dynamics*, 31(7–8): 843–857

Gunnarson B. E., Linderholm H. W., Moberg, A. (2011) Improving a tree-ring reconstruction from west-central Scandinavia: 900 years of warm-season temperatures. *Climate Dynamics*, 36(1): 97–108

Gurskaya M. A., Hallinger M., Eckstein D., Wilmking M. (2012b) Extreme cold summers in western Siberia, concluded from light-rings in the wood of conifers. *Phyton – Annales Rei Botanicae*, 52(1): 101–119

Gurskaya M., Hallinger M., Singh J., Agafonov L., Wilmking M. (2012a) Temperature reconstruction in the Ob River valley based on ring widths of three coniferous tree species. *Dendrochronologia*, 30(4): 302–309

Gurskaya M. A. (2017) Use of larch light rings for an evaluation of volcanic explosivity index. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 53(8): 769–780

Gurskaya M. A., Kukarskih V. V., Lange E. (2018) Reconstruction of summer temperature based on tree rings of Scots pine *Pinus sylvestris* L., growing in basin of Pechora river. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2: 59–73 (in Russian)

Heeter K. J., Harley G. L., Van De Gevel S. L., White P. B. (2019) Blue intensity as a temperature proxy in the eastern United States: A pilot study from a southern disjunct population of *Picea rubens* (Sarg.). *Dendrochronologia*, 55: 105–109

Holmes R. L. (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43(3): 69–78

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.) IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Kaczka R. J., Spyt B., Janecka K., Beil I., Büntgen U., Scharnweber T., Nievergelt D., Wilmking M. (2018) Different maximum latewood density and blue intensity measurements techniques reveal similar results. *Dendrochronologia*, 49: 94–101

Larsson L. (2013) CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder/Cdendro package version 7.6. URL: http://www.cybis.se/forfun/ dendro/

Linderholm H. W., Björklund J., Seftigen K., Gunnarson B. E., Fuentes M. (2015) Fennoscandia revisited: a spatially improved tree-ring reconstruction of summer temperatures for the last 900 years. *Climate Dynamics*, 45(3–4): 933–947

Linderholm H. W., Björklund J. A., Seftigen K., Gunnarson B. E., Grudd H., Jeong J.-H., Drobyshev I., Liu Y. (2010) Dendroclimatology in Fennoscandia – from past accomplishments to future potential. *Climate of the Past*, 6(1): 93–114

Lipp J., Trimborn P., Fritz P., Moser H., Becker B., Frenzel B. (1991) Stable isotopes in tree ring cellulose and climatic change. *Tellus B*, 43(3): 322–330

McCarroll D., Jalkanen R., Hicks S., Tuovinen M., Gagen M., Pawellek F., Eckstein D., Schmitt U., Autio J., Heikkinen O. (2003) Multiproxy dendroclimatology: a pilot study in northern Finland. *Holocene*, 13(6): 829–838

McCarroll D., Loader N. J., Jalkanen R., Gagen M. H., Grudd H., Gunnarson B. E., Kirchhefer A. J., Friedrich M., Linderholm H. W., Lindholm M., Boettger T., Los S. O., Remmele S., Kononov Y. M., Yamazaki Y. H., Young G. H. F., Zorita E. (2013) A 1200-year multiproxy record of tree growth and summer temperature at the northern pine forest limit of Europe. *Holocene*, 23(4): 471–484

Melvin T.M., Grudd H., Briffa K.R. (2013) Potential bias in 'updating'tree-ring chronologies using regional curve standardisation: re-processing 1500 years of Torneträsk density and ring-width data. *Holocene*, 23(3): 364–373

Mikola P. (1956) Tree-ring research in Finland. *Tree-Ring Bulletin*, 21: 16–20

Myglan V.S., Zharnikov Z.Y., Sidorova M.O., Barinov V.V., Tainik A.V. (2018) Application of the blue-intensity method for dating wooden buildings in Siberia. *Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia*, 46(4): 109–113

Nagavciuc V., Roibu C., Ionita M., Mursa A., Cotos M., Popa I. (2019) Different climate response of three tree ring proxies of Pinus sylvestris from the Eastern Carpathians, Romania. *Dendrochronologia*, 54: 56–63

Österreicher A., Weber G., Leuenberger M., Nicolussi K. (2015) Exploring blue intensity – comparison of blue intensity and MXD data from Alpine spruce trees. *TRACE – Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. Volume 13*. Wilson R.M., Helle G., Gärtner H. (Eds.) Scientific Technical Report 15/06, GFZ German Research Centre for Geosciences, p. 56–61

Parfitt R., Ummenhofer C.C., Buckley B.M., Hansen K.G., D'Arrigo R. D. (2020) Distinct seasonal climate drivers revealed in a network of tree-ring records from Labrador, Canada. *Climate Dynamics*, 54(3–4): 1897–1911

Reid E., Wilson R. (2020) Delta blue intensity vs. maximum density: a case study using *Pinus uncinata* in the Pyrenees. *Dendrochronologia*, 61: 125706

Rinn F. (2003) *TSAP-Win: time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. Version 0.55, User reference.* Heidelberg, Germany. Available at: http://www.rimatech.com

Rydval M., Larsson L.-A., McGlynn L., Gunnarson B.E., Loader N.J., Young G.H. F., Wilson R. (2014) Blue intensity for dendroclimatology: Should we have the blues? Experiments from Scotland. *Dendrochronologia*, 32(3): 191–204

Schweingruber F.H. (1996) *Tree rings and environment: dendroecology*. Paul Haupt AG Bern, 609 p.

Schweingruber F.H. (2012) *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*. Springer Science & Business Media, 276 p.

Seftigen K., Fuentes M., Ljungqvist F.C., Björklund J. (2020) Using Blue Intensity from drought-sensitive Pinus sylvestris in Fennoscandia to improve reconstruction of past hydroclimate variability. *Climate Dynamics*, 55(3–4): 579–594

Speer J.H. (2010) *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press, 368 p.

Tsvetanov N., Dolgova E., Panayotov M. (2020) First measurements of Blue intensity from *Pinus peuce* and *Pinus heldreichii* tree rings and potential for climate reconstructions. *Dendrochronologia*, 60: 125681

Wang F., Arseneault D., Boucher E., Galipaud Gloaguen G., Deharte A., Yu S., Trou-kechout N. (2020a) Temperature sensitivity of blue intensity, maximum latewood density, and ring width data of living black spruce trees in the eastern Canadian taiga. *Dendrochronologia*, 64: 125771

Wang F., Arseneault D., Boucher E., Yu S., Ouellet S., Chaillou G., Delwaide A., Wang L. (2020b) Chemical destaining and the delta correction for blue intensity measurements of stained lake subfossil trees. *Biogeosciences*, 17(18): 4559–4570

Wigley T. M. L., Briffa K. R., Jones P. D. (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate & Applied Meteorology*, 23(2): 201–213

Wilson R., Anchukaitis K., Briffa K. R., Büntgen U., Cook E., D'Arrigo R., Davi N., Esper J., Frank D., Gunnarson B., Hegerl G., Helama S., Klesse S., Krusic P. J., Linderholm, H. W., Myglan, V., Osborn T. J., Rydval M., Schneider L., Schurer A., Wiles G., Zhang P., Zorita E. (2016) Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context. *Quaternary Science Reviews*, 134: 1–18

Wilson R., Anchukaitis K., Andreu-Hayles L., Cook E., D'Arrigo R., Davi N., Haberbauer L., Krusic P., Luckman B., Morimoto D., Oelkers R., Wiles G., Wood C. (2019) Improved dendroclimatic calibration using blue intensity in the southern Yukon. *Holocene*, 29(11): 1817–1830

Wilson R., Wilson D., Rydval M., Crone A., Büntgen U., Clark S., Ehmer J., Forbes E., Fuentes M., Gunnarson B. E., Linderholm H. W., Nicolussi K., Wood C., Mills C. (2017) Facilitating tree-ring dating of historic conifer timbers using Blue Intensity. *Journal of Archaeological Science*, 78: 99–111

Zhang P., Linderholm H. W., Gunnarson B. E., Björklund J., Chen D. (2016) 1200 years of warm-season temperature variability in central Scandinavia inferred from tree-ring density. *Climate of the Past*, 12(6): 1297–1312