

Научная статья
УДК 911.2: 551.58
doi: 10.17223/25421379/25/10

КЛИМАТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ В РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА СОЛОВЕЦКОМ АРХИПЕЛАГЕ

Надежда Сергеевна Семеняк¹, Ольга Николаевна Соломина²,
Екатерина Антоновна Долгова³, Владимир Владимирович Мацковский⁴



^{1, 2, 3, 4} Институт географии РАН, Москва, Россия

¹ semenyak@igras.ru

² solomina@igras.ru

³ dolgova@igras.ru

⁴ matskovsky@igras.ru

Аннотация. Рассматривается климатический отклик сосны обыкновенной на территории Соловецкого архипелага. В результате проведенных работ построены четыре хронологии продолжительностью 175 лет на основе различных параметров годичных колец – ширины кольца, ширины ранней и поздней древесины, оптической плотности поздней древесины. Установлено, что именно оптическая плотность поздней древесины является подходящим параметром для создания палеоклиматической реконструкции на Соловецком архипелаге.

Ключевые слова: древесно-кольцевой анализ, климатическая функция отклика, Соловецкий архипелаг, оптическая плотность

Источник финансирования: работа частично выполнена при поддержке гранта РНФ 21-17-00264 (полевые работы) и профинансирована в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) (климатический сигнал).

Для цитирования: Семеняк Н.С., Соломина О.Н., Долгова Е.А., Мацковский В.В. Климатический сигнал в различных параметрах годичных колец сосны обыкновенной на Соловецком Архипелаге // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 149–164. doi: 10.17223/25421379/25/10

Original article
doi: 10.17223/25421379/25/10

CLIMATE SIGNAL IN DIFFERENT PARAMERS OF TREE-RINGS OF PINE IN THE SOLOVETSKY ARCHIPELAGO

Nadezhda S. Semenyak¹, Olga N. Solomina², Ekaterina An. Dolgova³, Vladimir V. Matskovsky⁴

^{1, 2, 3, 4} Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ semenyak@igras.ru

² solomina@igras.ru

³ dolgova@igras.ru

⁴ matskovsky@igras.ru

Abstract. The dendroclimatic analysis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing on the Solovetsky Archipelago is presented in the paper. Based on the measurements of tree-ring parameters, four chronologies lasting 175 years were developed: 1) the annual ring width, 2) the earlywood and 3) latewood widths, 4) and the Blue Intensity. Tree-ring width is the most commonly measured parameter. Blue Intensity is a surrogate for maximum (X-ray) density (MXD). A correlation analysis carried out between the chronologies showed significant coefficients among themselves.

The response function analysis was applied for each chronology. Each tree-ring parameter is controlled by different climatic factors. It has been established that the tree-ring width and the earlywood width are negatively affected by the summer temperatures of the previous year, and positively influenced by precipitation of the current year. The temperatures of March, May and July, as well as the precipitation of July of the current year, are important for the formation of latewood. In addition, a more detailed dendroclimatic analysis was carried out, namely, the calculation of partial correlations, which show the influence of primary and secondary climatic factors on the chronology. As a result of the analysis, the influence of July precipitation on the growth of latewood was found. This association is significant even when both primary and secondary variables are used. The relationship between the Blue Intensity and climatic parameters is significantly different. It is characterized by high correlation coeffi-

cients with the temperature of the warm period (April - September). The climatic signal inferred in Blue Intensity shows more temporal stability compared to other studied tree-ring parameters. The obtained for Solovetsky Archipelago do not contradict with previous findings in neighboring regions, for example, in Fennoscandia. Comparing the signal strength and temporal stability in various tree-ring parameters, it can be confidently stated that Blue Intensity is the most promising parameter for developing a paleoclimatic reconstruction in the Solovetsky Archipelago.

Keywords: dendrochronology, the Solovetsky archipelago, climatic response function, tree-ring width, blue intensity

Source of financing: The study was supported by the Russian Science Foundation grant no.21-17-00264 (laboratory part and analyses), and State assignment project no. FMGE-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5) (field work).

For citation: Semenyak N.S., Solomina O.N., Dolgova E.A., Matskovsky V.V. (2022) Climatal signal in different paramers of tree-rings of pine in the Solovetsky Archipelago. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 149–164. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/10

Введение

Древесно-кольцевые хронологии (ДКХ) – важный архив, хранящий информацию об изменении климата в прошлом. Особенно велика роль дендрохронологии для реконструкций климата последних двух тысячелетий, для которых имеется обширный материал по живым деревьям, архитектурной, археологической и погребенной древесине. Обилие ДКХ позволяет проводить пространственные реконструкции годичного разрешения на больших территориях для основных климатических параметров – температуры [Schweingruber, Shiyatov, Shishov, 2000; Briffa, Osborn, Schweingruber, 2004; Ljungqvist et al., 2019] и увлажнения [Cook et al., 2015; 2020; Anchukaitis et al., 2017; Ljungqvist et al., 2020].

Разные параметры годичных колец (например, ширина, плотность, соотношение стабильных изотопов и анатомические особенности древесины) по-разному реагируют на различные комбинации гидрометеорологических факторов, поэтому в каждом отдельном случае требуется определить наиболее подходящие для реконструкции параметры годичных колец [Briffa, Osborn, Schweingruber, 2004].

Традиционно для палеоклиматических реконструкций использовалась ширина годичных колец [Fritts, 1966; Schweingruber, 2012], но затем было показано, что во многих случаях более чувствительным индикатором климата служит максимальная плотность годичных колец [Schweingruber et al., 1978; Schweingruber, Briffa, Nogler, 1993; Briffa et al., 1998].

Максимальная плотность поздней древесины (MXD) главным образом используется для реконструкции летних температур [Frank, Esper, 2005; Esper et al., 2014, 2015, 2018; Rydval et al., 2014]. Хронологии по MXD меньше подвержены влиянию биологических особенностей деревьев, что является дополнительным преимуществом для палеоклиматических реконструкций.

Измерение плотности годичных колец обычно осуществляется методом рентгенографии, очень трудоемко. Поэтому в качестве заменителя рентге-

новской плотности используют оптическую плотность – отраженный видимый свет [Yanosky, Robinove, 1986; Yanosky, Robinove, Clark, 1986; Clauson, Wilson, 1991]. McCarroll и соавт. [2002] установили, что яркость в синем диапазоне спектра имеет более высокую корреляцию с максимальной плотностью древесины, чем в зеленом, ультрафиолетовом и красном диапазонах. Именно отраженную яркость в синем диапазоне спектра, называемую Blue Intensity (BI), и используют в качестве показателя оптической плотности. Blue Intensity обратно коррелирует с плотностью древесины, т. е. древесина с более высокой плотностью отражает меньше света и выглядит темнее [Sheppard, Graumlich, Conkey, 1996; Campbell et al., 2007].

Хронологии по оптической плотности и основанные на них палеорекострукции построены в настоящее время уже для многих районов земного шара [McCarroll et al., 2013; Björklund et al., 2015; Linderholm et al., 2015; Fuentes et al., 2018], на северо-западе [Tene et al., 2011; Wilson et al., 2012; Rydval et al., 2017], западе [Trachsel et al., 2012] и востоке Европы [Kaczka et al., 2017, 2018; Rydval et al., 2018], в Северной Америке [Wilson et al., 2014, 2017a] и на Кавказе [Dolgova, 2016], а также в тропиках [Buckley et al., 2018]. Они использованы в полушарных реконструкциях температуры [Wilson et al., 2016; Anchukaitis et al., 2017]. В некоторых районах BI оказалась чувствительной к осадкам [Dannenbergh, Wise, 2016; Seftigen et al., 2020], а также использовалась для выявления всплесков вредоносных насекомых [Arbellay et al., 2018].

Оптическая плотность нашла применение и в археологии. Как показывают некоторые работы, датировки, полученные на основе BI, часто показывают более статистически значимые результаты, чем аналогичные датировки по ширине колец [Mills et al., 2017; Wilson et al., 2017b].

Лесные насаждения Соловецкого архипелага давно являются предметом исследований [Ипатов и др., 2009; Соболев, Феклисов, 2011]. В работе Ловелиуса и соавт. [2012] проанализированы хронологи-

гии на основе ширины годовых колец по сосне и ели продолжительностью 300 и 255 лет соответственно. Авторы установили схожие особенности изменения прироста годовых колец у двух лесобразующих пород на острове Большой Соловецкий. Была выявлена связь ширины колец с температурой воздуха, атмосферными осадками и солнечной активностью.

Соломина и соавт. [2011] построили первую сводную хронологию по ширине колец продолжительностью 824 года (1185–2008 гг.) на основе живых деревьев и древесины из архитектурных памятников. В работе Мацкого [2013] было показано, что образцы сосны и ели датируются между собой, что свидетельствует о сходстве условий, на которые реагирует ширина колец этих двух пород. Долгова и соавт. [2019] установили, что большинство локальных хронологий сосны значимо коррелирует с температурой июля, причем теснота корреляции почти не зависит от типа ландшафта.

В нашем исследовании мы оцениваем и сравниваем потенциал различных параметров годовых колец сосны обыкновенной – ширины кольца, ширины ранней и поздней древесины, оптической плотности поздней древесины для целей палеорекострукции на Соловецких островах.

Район работ

Соловецкие острова – крупнейший архипелаг Беломорского бассейна. Они находятся в сравнительно мелководной западной половине Белого моря при

входе в Онежский залив, образуя западный и восточный проходы в него [Природная среда..., 2007].

Соловецкие острова имеют ледниковое происхождение. Основа островов – принесенные ледником моренные отложения, состоящие из валунов, гравия, песка и глины. Помимо холмисто-моренного типа рельефа, выделяются рельеф морских террас и заболоченные зандровые поверхности [Богославский, 1966; Колосова, 1999; Природная среда..., 2007].

На архипелаге преобладают подзолистые почвы, но встречаются и другие типы – от примитивных карликовых хрящеватых подзолов на валунах до плодородных дерново-глеевых на подветренных склонах холмов.

Несмотря на то что Соловецкие острова расположены недалеко от Полярного круга, здесь сформировались климатические условия, нехарактерные для этой географической широты. Климат островов сравнительно мягкий, умеренно теплый морской, переходный к континентальному и отличается от материковой части на той же широте. Различия выражаются в меньшем перепаде температур по сравнению с континентом, в высокой влажности воздуха и в относительном запаздывании времен года (рис. 1). Вегетационный период со среднесуточными температурами выше +5 °C длится в среднем 128 дней, с 20 мая по 1 октября. В Архангельске он длиннее почти на декаду. Активная часть вегетационного периода с температурами выше 10 °C продолжается 74 дня, с 20 июня по 3 сентября [Ипатов и др., 2009].

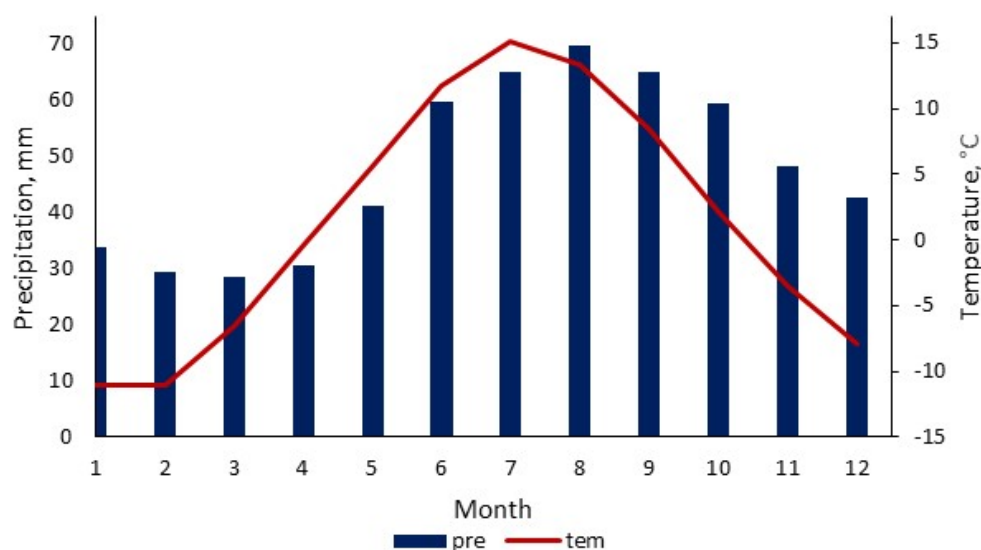


Рис. 1. Климатические данные (осадки и температура) по данным CRU TS 4.01 [Harris et al., 2014] из узла точки (64°75' с.ш., 35°75' в.д.), ближайшего к месту наших работ

Fig. 1. Climatic data (precipitation and temperature) according to CRU TS 4.01 [Harris et al., 2014] from the point node (64°75' N, 35°75' E) closest to the site of our work

Для Соловецких островов характерны сильные ветровые нагрузки, которые влияют на рост деревьев.

Своеобразный климат, рельеф и почвы формируют лесорастительные условия от весьма благоприятных до совершенно непригодных для произрастания леса. По лесорастительному районированию Соловецкий архипелаг относится к северной подзоне тайги [Ипатов и др., 2009]. Здесь проходит граница двух физико-географических областей – леса и тундры, между которыми существует полоса переходных ландшафтов.

В работе Природная среда [2007] были выделены следующие природные комплексы: 1 – ельники; 2 – сосняки сфагновые и болота с сосной; 3 – сосняки лишайниковые; 4 – березняки и осинники; 5 – березовые криволесья в сочетании с фрагментами вороничных тундр и болот; 6 – вороничные тундры с фрагментами березовых криволесий и болот; 7 – необлесенные кустарничково-сфагновые болота; 8 – березово-еловые леса.

Материалы и методы исследования

Для проведения дендроклиматологических исследований нами была выбрана экспериментальная площадка – В75s (65°03' с.ш., 35°64' в.д.). На ней с помощью ручного приростного бура Пресслера на высоте 1–1,5 м от поверхности земли были отобраны 42 керны сосны из 21 дерева. Дальнейшая обработка образцов проводилась в дендрохронологической лаборатории Института географии РАН.

Проводились измерения четырех параметров годовых колец (ширина кольца, ширина ранней и поздней древесины, оптическая плотность поздней древесины). Ранняя древесина (внутренняя часть годовичного кольца) обращена к сердцевине, светлая и мягкая; поздняя (наружная часть) – к коре, темная и твердая. Различие между ранней и поздней древесиной у хвойных деревьев ясно выражено.

Ранняя древесина образуется в начале лета и служит для проведения воды вверх по стволу. Она отличается наличием крупных, достаточно хорошо заметных трахеид. Поздняя древесина откладывается к концу лета и выполняет в основном механическую функцию [Шиятов и др., 2000]. Оптическая плотность – это интенсивность отраженного света в синем диапазоне, которую получают по изображениям кернов в высоком разрешении.

Перед проведением измерений из древесных кернов удалялась смола. Экстракция происходила с помощью нагретого растворителя (в нашем случае этиловый спирт) в аппарате Сокслета. Прибор позволяет производить многократное повторение процесса за счет замкнутости системы. Удаление смол из древесных кернов длится не менее 48 ч.

После извлечения из экстрактора аппарата Сокслета керны были высушены в вытяжном шкафу и приклеены на специальные деревянные подложки. Далее на микротоме верхний слой древесины был срезан для получения плоской поверхности. Затем на ленточно-шлифовальной машине была произведена шлифовка образцов с последовательными сменами наждачной бумаги (до 1 000 зерен) до получения гладкой поверхности, позволяющей четко наблюдать структуры древесины при увеличении.

Затем поверхность кернов была отсканирована с разрешением 3 200 dpi на устройстве Epson Perfection V700, сопряженном с программным обеспечением Silverfast. Важнейшим этапом является калибровка сканера с помощью цветowych карточек «Кодак». Отсканированные керны были измерены в программе CooRecorder, которая позволяет производить измерения различных параметров годовичного кольца на одном керне [Larsson, 2013]. Оператор, работающий с этой программой, в полуавтоматическом режиме устанавливает границы годовичных колец. Для измерения оптической плотности важным аспектом является оптимальные размеры выбора «окна», с которого будут «считываться» данные.

После измерения каждого параметра колец с помощью программного обеспечения COFECNA [Holmes, 1983] проводился контроль измерений и перекрестной датировки, поиск выпадающих и ложных колец [Fritts, 1966]. Затем для каждого параметра кольца были построены сводные хронологии путем деления годовых значений на соответствующее значение аппроксимирующей кривой (отрицательная экспонента) для полной серии измерений. Стандартные хронологии, построенные таким способом, были затем использованы для статистического анализа и определения их чувствительности со среднемесячными температурами и осадками. Вся обработка древесно-кольцевых серий была проведена в дендрохронологическом пакете программ DplR в среде R [Bunn, 2008]. Качество хронологий оценивалось с помощью выраженного популяционного сигнала (EPS) [Briffa, Jones, 1990]. Значения $EPS > 0,85$ использовались в качестве порога, представляющего надежную и достоверную часть хронологий [Wigley, Briffa, Jones, 1984].

Климатические данные представлены рядами инструментальных наблюдений за среднемесячной температурой и осадками сеточного архива CRU TS 4.01 [Harris et al., 2014] из узла точки (64°75' с.ш., 35°75' в.д.), ближайшего к месту наших работ. Для выявления тесноты связи между приростом сосны и метеорологическими параметрами была использована климатическая функция отклика, а именно коэффициенты множественной линейной регрессии индексов древесно-кольцевой хронологии на главные компо-

ненты месячных климатических данных [Zang, Biondi, 2015]. Статистическая значимость коэффициентов регрессии оценена бутстреп-методом [Guiot, 1991]. Этот статистический метод, состоящий в многократном расчете интересующей статистики на основе множества выборок, сформированных по исходным данным, позволяет правильно оценить значимость полученных значений статистики в условиях сложной структуры данных. Хронологии сравнивались с климатическими данными за 15 месяцев (с июня предыдущего года по сентябрь текущего года). Помимо этого был проведен анализ устойчивости сигнала во времени для каждого параметра. Для этого климатическая функция отклика рассчитывалась в плавающем 35-летнем окне с перекрытием в 2 года. В этой работе дендроклиматический анализ был проведен в дендрохронологическом пакете TreeClim [Zang, Biondi, 2015], реализованном в среде R. Также мы использовали функцию seascoot для расчета сезонных корреляций между климатическими параметрами и хронологиями разных параметров годовых колец.

Результаты

На рис. 2 показаны четыре хронологии, построенные по описанной выше методике. Длина хронологий составляет 1841–2016 гг., $EPS > 0,85$ с 1889 г.

На рис. 2 видно, что все четыре хронологии согласуются друг с другом – минимумы и максимумы на них преимущественно отмечаются в одни и те же годы, хотя есть и исключения (например, 1901 и 1936 гг.).

Наибольшую изменчивость показывает ширина поздней древесины, амплитуда изменчивости ширины ранней древесины и оптической плотности существенно меньше.

Закономерно высокие коэффициенты корреляции ($r = 0,95$, $P < 0,05$) наблюдаются между шириной годовичного кольца и шириной ранней древесины, которая составляет существенную его часть. Все параметры ширины кольца имеют высокие корреляции между собой ($r = 0,59–0,95$), тогда как оптическая плотность менее тесно коррелирует с ними ($r = 0,37–0,42$) (рис. 3).

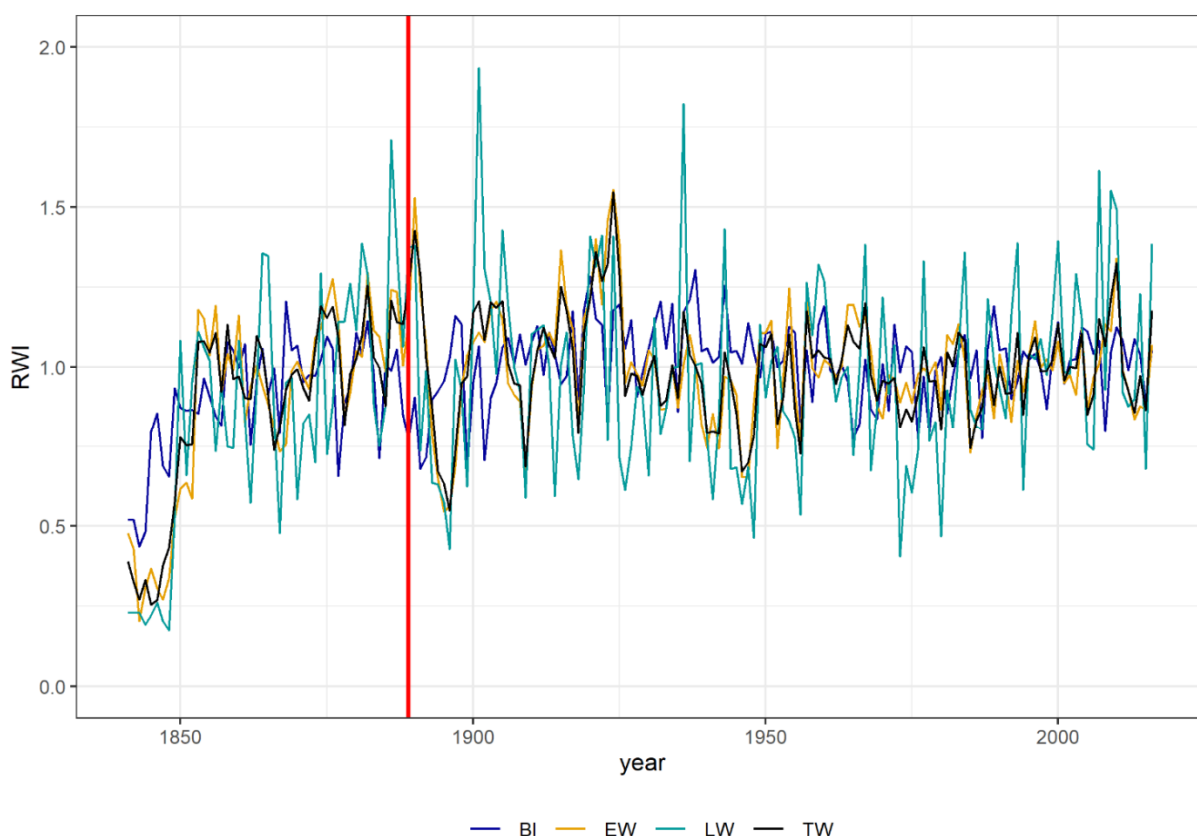


Рис. 2. Стандартные хронологии ширины годовичных колец (TW) сосны, ранней (EW) и поздней (LW) древесины и оптической плотности поздней древесины (BI). Общий период хронологий: 1841–2016 гг., красная вертикальная линия показывает $EPS > 0,85$ с 1889 г.

Fig. 2. Standard chronologies of tree-ring width (TW) pine, earlywood (EW) and latewood (LW) and blue intensity (BI) the common period: 1841–2016, red vertical line shows $EPS > 0.85$ from 1889

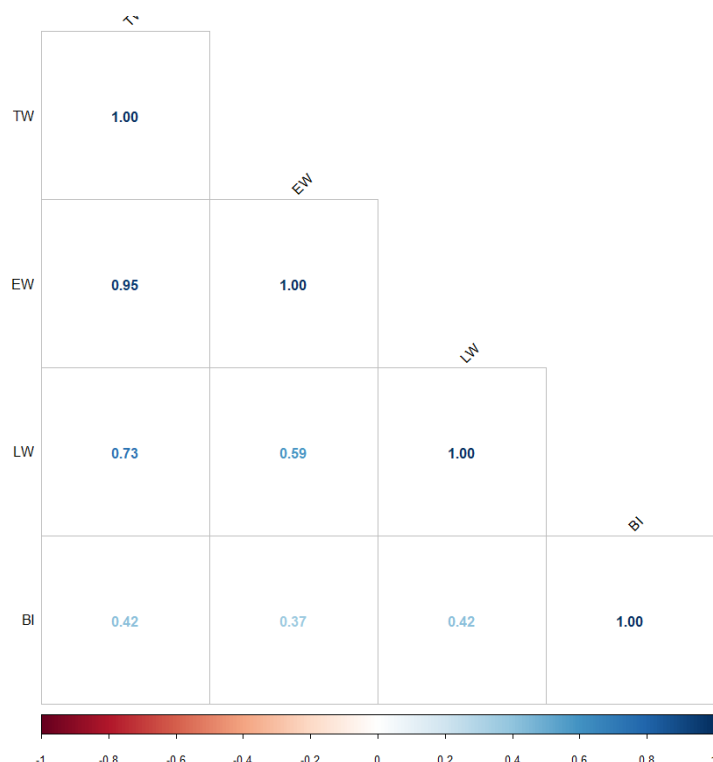


Рис. 3. Коэффициенты корреляции Пирсона, рассчитанные для хронологий различных параметров годичных колец сосны за общий период 1841–2016 гг. ($P < 0,05$)

Fig. 3. Correlations (Pearson's coefficient) between tree-ring width (TW), earlywood (EW), latewood (LW) and blue intensity (BI) chronologies of *Pinus sylvestris* for the common period 1841–2016 (the significance level of $P < 0.05$)

Невысокие коэффициенты корреляции между оптической плотностью и параметрами ширины годичных колец косвенно свидетельствуют о влиянии разных климатических факторов на формирование этих параметров.

На рис. 4 показана функция отклика различных параметров годичных колец сосны на среднемесячные суммы осадков. Ожидаемо связь с осадками слабая, в основном статистически незначимая, поскольку на северном пределе произрастания лесов увлажнение редко бывает недостаточным и не является фактором, лимитирующим прирост. Установлено, что связи с осадками предыдущего года статистически незначимы. Самые высокие коэффициенты обнаружены у ширины колец поздней древесины с осадками июля ($r = 0,33$). Ранняя древесина показала значимые положительные коэффициенты для февраля, мая и июня, а ширина кольца – для февраля, мая, июня, июля и сентября. Для оптической плотности обнаружены отрицательные коэффициенты регрессии с осадками июля и августа ($-0,16$ и $-0,19$ соответственно).

На рис. 5 показана функция отклика разных параметров годичных колец на среднемесячные температуры. Для оптической плотности обнаружены значимые положительные коэффициенты с температу-

рой теплого периода (апрель–август). У ширины годичных колец и ранней древесины фиксируются значимые отрицательные связи с температурой августа прошлого года ($-0,26$ и $-0,23$). На прирост поздней древесины отрицательно влияет температура июля и августа прошлого года ($-0,16$ и $-0,23$), а положительный отклик отмечается на температуру марта, мая и июля.

Таким образом, анализ функции отклика показал, что даже в довольно суровых условиях вблизи северной границы леса у сосны на Соловецких островах наблюдается климатический сигнал не только на температуру воздуха, но и на осадки. Тем не менее устойчивость климатической функции во времени показывает, что оптическая плотность – единственный параметр из исследованных нами, для которого сигнал на температуру устойчив на всем протяжении метеонаблюдений с 1901 по 2016 г., он отражает зависимость плотности от температуры всего теплого сезона с апреля по август (см. рис. 6). Это означает, что оптическая плотность поздней древесины является наиболее подходящим параметром для реконструкции температуры на Соловецком архипелаге. Связь с осадками июля и августа у плотности также устойчива, но отрицательна.

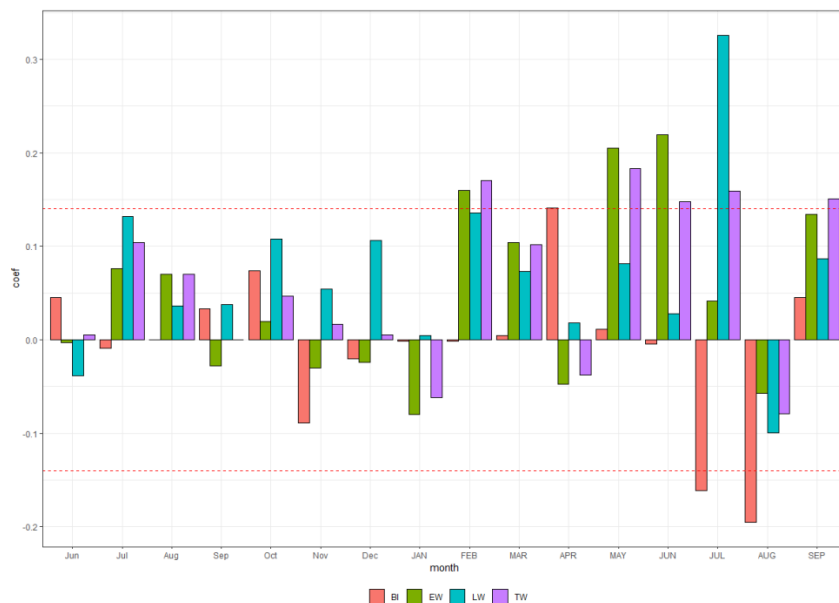


Рис. 4. Коэффициент регрессии между хронологиями по ширине колец (TW), ранней (EW), поздней (LW) древесины, оптической плотностью поздней древесины (BI) и среднемесячными осадками для общего периода 1901–2016 гг.

Здесь и на рис. 5: строчными буквами обозначены месяцы предыдущего года, прописными – текущего. Красной пунктирной линией показан уровень значимости $P < 0,05$

Fig. 4. Regression coefficient between tree-ring width (TW), earlywood (EW), latewood (LW) and blue intensity (BI) chronologies of *Pinus sylvestris* with total monthly precipitation for the period 1901–2016

Here and in the fig. 5: months of the previous year are indicated in lowercase letters, and the current year in uppercase letters. The red dotted line shows the significance level of $P < 0.05$

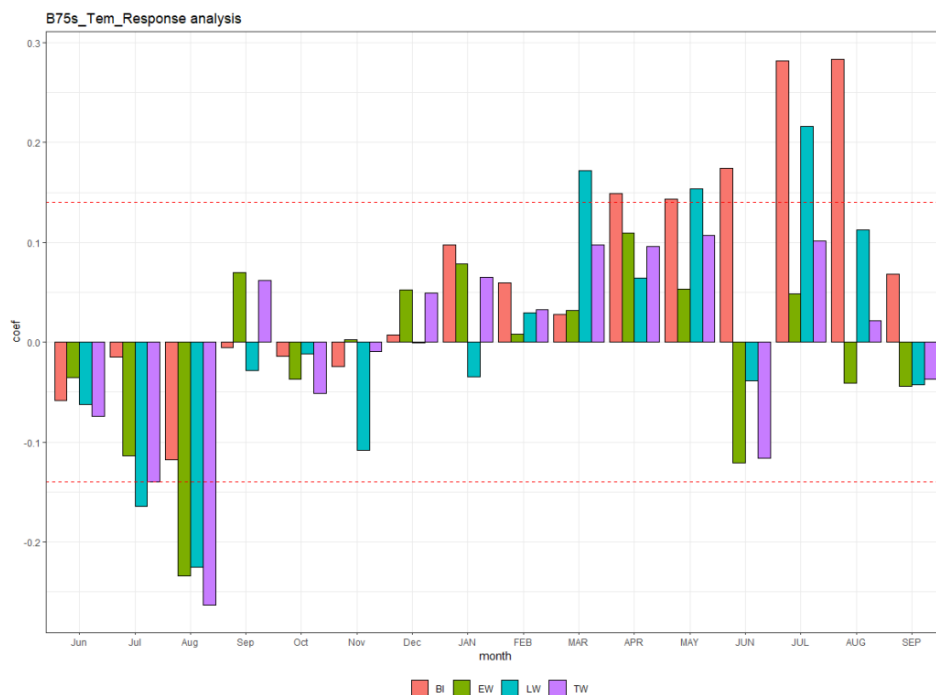


Рис. 5. Коэффициент регрессии между хронологиями по ширине колец (TW), ранней (EW), поздней (LW) древесины, оптической плотностью поздней древесины (BI) и среднемесячными температурами для общего периода 1901–2016 гг.

Fig. 5. Regression coefficient between tree-ring width (TW), earlywood (EW), latewood (LW) and blue intensity (BI) chronologies of *Pinus sylvestris* chronologies with mean monthly temperature for the period 1901–2016

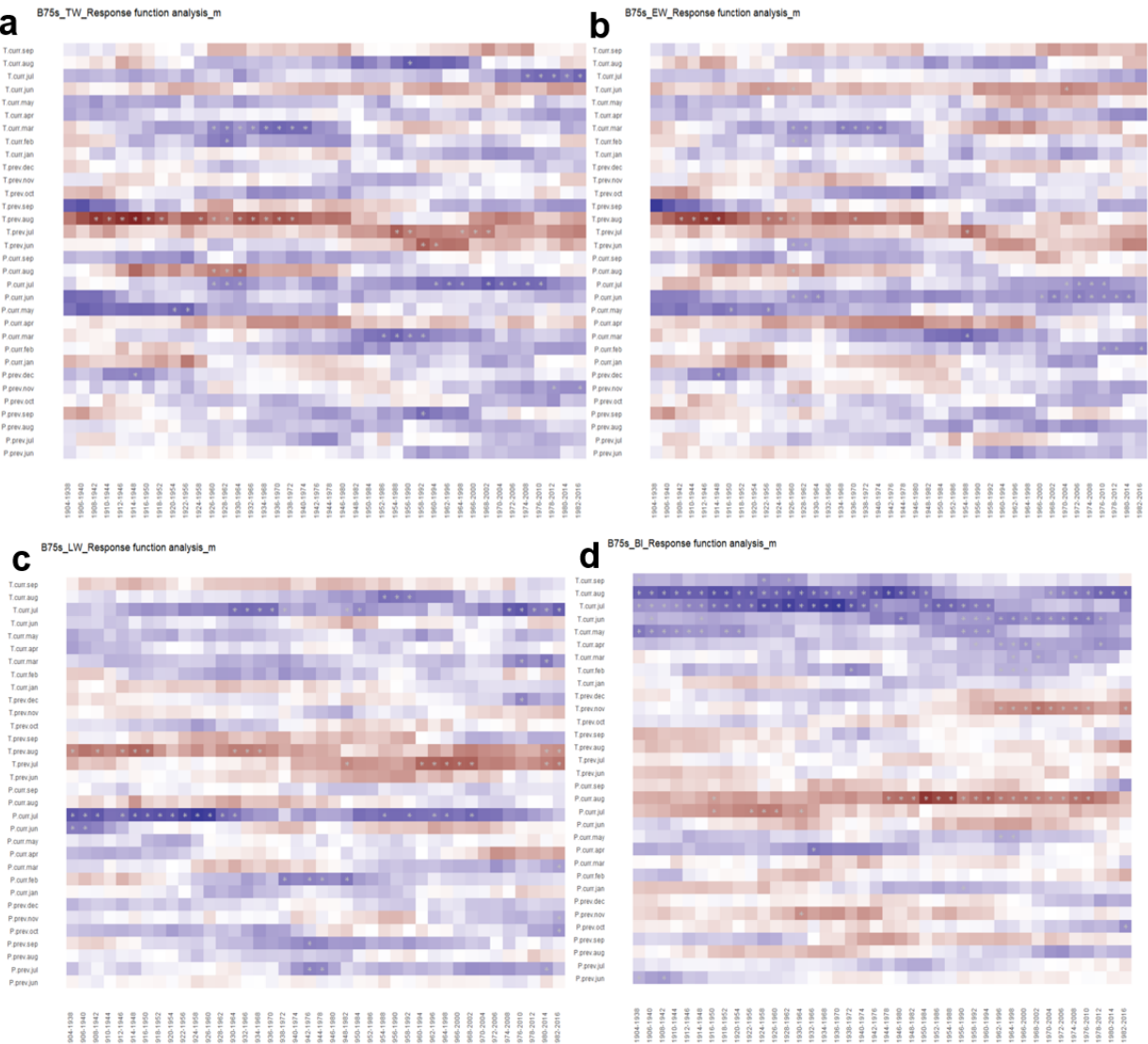


Рис. 6. Устойчивость климатической функции отклика во времени за период 1901–2016 гг.

a – ширина колец (TW), *b* – ранняя (EW), *c* – поздняя (LW) древесина, *d* – оптическая плотность поздней древесины (BI). Звездочками показаны значимые коэффициенты ($P < 0,05$). Коэффициенты рассчитывались в плавающем 35-летнем окне с заданным перекрытием (2 года)

Fig. 6. Stability of the climatic response function over time for the period 1901–2016

a – ring width (TW), **b** – earlywood (EW), **c** – latewood (LW), **d** – blue intensity (BI) chronologies. Asterisks indicate significant coefficients ($P < 0.05$). The coefficients were calculated in a floating 35-year window with a given overlap (2 years)

Обсуждение

В рамках нашего исследования для поиска подходящего параметра также была рассчитана хронология по скорректированной поздней древесине (LWW) [Meko, Baisan, 2001]. Meko и соавт. [2001] в своем исследовании показали, что, убрав линейную зависимость ранней древесины от поздней, можно добиться усиления климатического сигнала и тем самым улучшить палеоклиматическую реконструкцию. Рассчитав климатическую функцию отклика у

данного параметра, мы не обнаружили значительных отличий от показателей хронологии поздней древесины, поэтому этот параметр был исключен из дальнейшего анализа.

При анализе климатической функции отклика хронологии ширины поздней древесины мы обнаружили комплексный характер сигнала. На рис. 7 показаны коэффициенты корреляции Пирсона между хронологией поздней древесины и климатическими переменными с помощью программы `seascorr`. Эта программа позволяет разделить первичные и

вторичные климатические факторы, влияющие на прирост, что особенно важно при скоррелированности климатических параметров. Значимое влияние осадков июля на ширину поздней древесины наблюдается при использовании осадков и как первичного, и как вторичного фактора. Примечателен тот факт, что если первичной переменной назначается температура, а вторичной – осадки, сигнал осадков июля становится сильнее. Таким образом, значимая частная корреляция показывает, что хронологии поздней древесины имеют потенциал для реконструкции

осадков на Соловецком архипелаге, но температурный сигнал частично маскирует отклик на осадки.

Таким же образом с помощью функции `seascorr` были рассчитаны коэффициенты корреляции за 1, 3 и 6 месяцев для хронологии по оптической плотности поздней древесины (рис. 8). На рисунке 8 видно, что коэффициент корреляции с первичным климатическим параметром (температура) доходит до значения 0,6, тем самым показывая высокий потенциал оптической плотности для реконструкции летней температуры на Соловецком архипелаге.

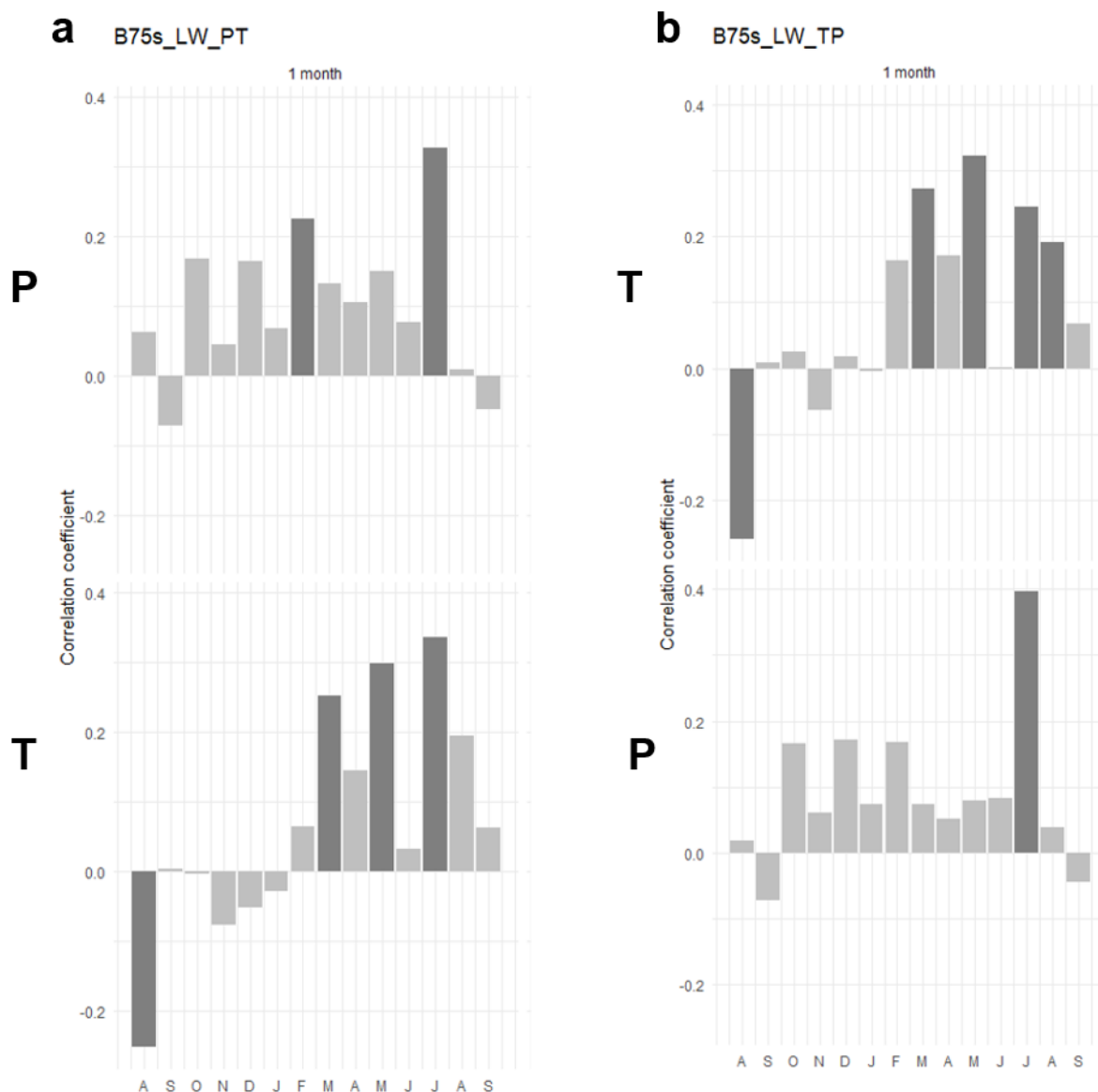


Рис. 7. Корреляции и частные корреляции между хронологией поздней древесины и сезонными климатическими переменными

a – первичная климатическая переменная – осадки (P), частные корреляции (снизу) со вторичной климатической переменной – температурой (T); *b* – первичная климатическая переменная – температура (T), частные корреляции (снизу) со вторичной климатической переменной – осадки (P)

Fig. 7. Correlations and partial correlations latewood chronology (LW) with seasonalized climate variables

a – primary climate variable – precipitation (P), partial correlations (bottom) with a secondary climatic variable – temperature (T); *b* – primary climatic variable – temperature (T), partial correlations (from below) with a secondary climatic variable – precipitation (P)

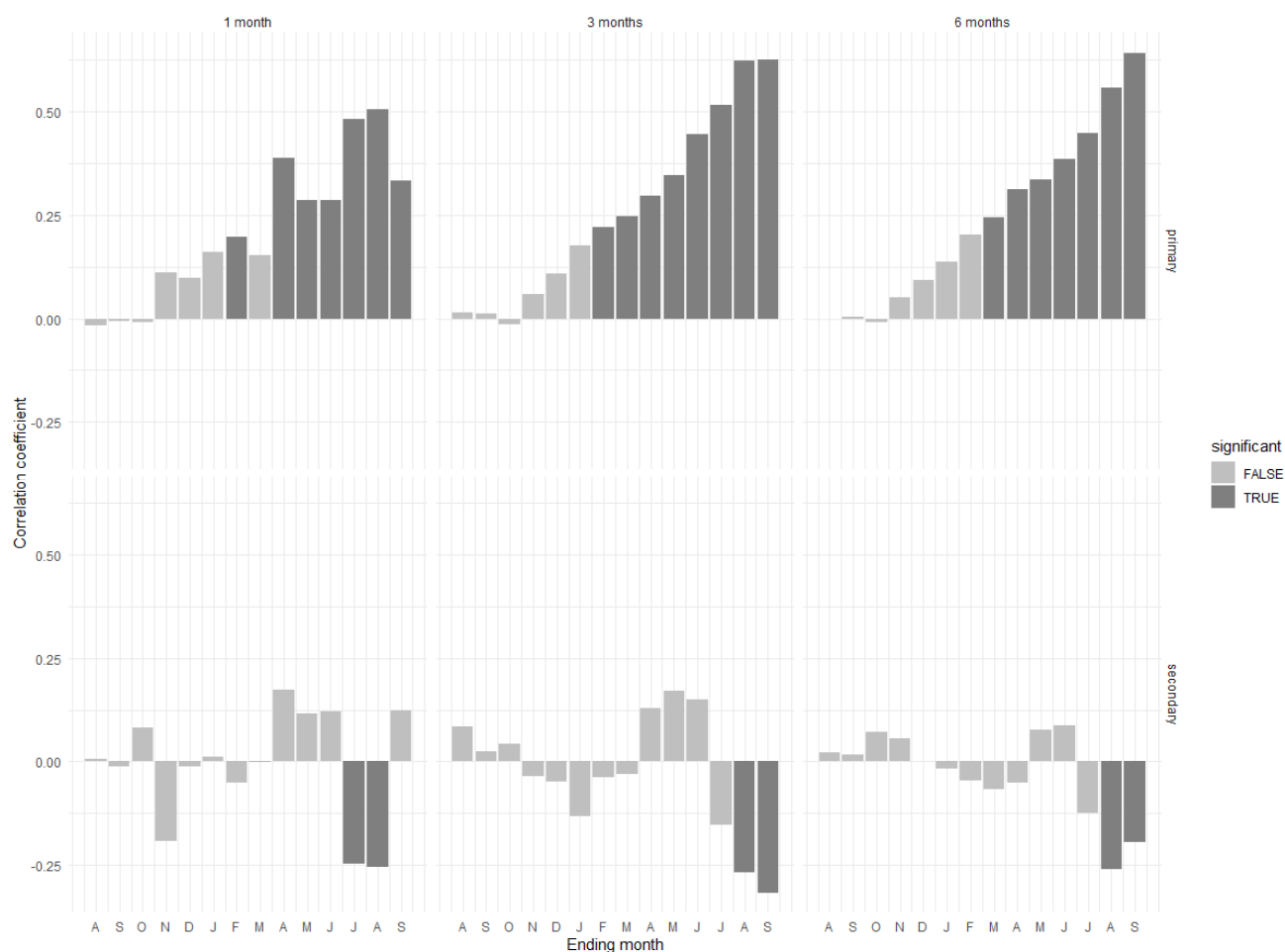


Рис. 8. Корреляции и частные корреляции хронологии по оптической плотности поздней древесины с сезонными климатическими переменными

(Вверху) простые корреляции с первичной климатической переменной, T (температура), (снизу) частные корреляции со вторичной климатической переменной, P (осадки)

Fig. 8. Correlations and partial correlations blue intensity chronology with seasonalized climate variables

(Top) Simple correlations with the primary climate variable, T (temperature), partial correlations of tree-ring index with the secondary climate variable, P (precipitation)

Этот анализ (см. рис. 8) показывает статистически значимую связь с летними температурами вегетационного периода, причем наиболее сильные корреляции наблюдаются в июле и августе. Значительные сезонные (3-месячные) корреляции также последовательно выявляются для лета. Максимальная корреляция ($r = 0,61$) наблюдается для 6-месячного периода апрель–сентябрь. Возможно, для 4- и 5-месячных периодов значения коэффициентов корреляции будут еще выше.

Результаты анализа отклика разных параметров годичных колец сосны на Соловецком архипелаге не противоречат полученным ранее выводам в соседних регионах. Так, например, в работе Кононова [2018] показано, что на Кольском полуострове (Хи-

бины) ширина годичных колец сосны реагирует на температуру июня–июля, а также на осредненные значения летних месяцев.

В работе Ваганова и соавт. [1996] для обширной территории (от Полярного Урала на западе до Чукотки на востоке) был выявлен сильный климатический сигнал в клеточных хронологиях и хронологиях по ширине годичных колец с температурой летних месяцев (июнь–июль). Эти данные получены по разным видам лиственниц, ели сибирской и сосне обыкновенной.

Düthorn и соавт. [Düthorn et al., 2016] исследовали климатический сигнал в хронологиях по ширине годичных колец и максимальной плотности сосны вдоль бореального градиента от 60 до 69 с.ш. Инте-

ресно, что климатический отклик хронологий MXD схож на протяжении всей трансекты и связан с летними температурами, а на ширину годовичных колец сильно влияет место произрастания деревьев.

Helama и соавт. [Helama et al., 2013] анализировали связь между климатическими данными и различными параметрами (ширина, ранняя, поздняя древесина и оптическая плотность) в прибрежных (влажных) и нагорных (сухих) местообитаниях в Финляндии. Авторы показали, что оптическая плотность, в отличие от других параметров, демонстрирует сильную связь с теплым периодом (апрель–сентябрь).

В Фенноскандии Grudd и соавт. [2002] демонстрируют высокую корреляцию ширины годовичных колец с летними месяцами (июнь–август). Важным результатом этой работы является доказательство возможности использования для перекрестного датирования субфоссированной древесины, залегающей в озерных отложениях, или плавника, лежащего на морских террасах. Это важно для удлинения хронологий годовичных колец, как это сделано, например, в Фенноскандии и на севере Евразии [Grudd et al., 2002; Hellmann et al., 2016].

Продление хронологий по живым деревьям возможно и с помощью древесины, использованной в архитектурных сооружениях. И в этом случае применим метод оптической плотности, хотя при его использовании возникает определенная специфика, связанная с различной интенсивностью синего цвета между заболонью и сердцевиной, а также между образцами живой и погребенной древесины [Björklund et al., 2014]. Этот факт для нас важен, так как создание длинной древесно-кольцевой хронологии на Со-

ловецких островах предполагает включение образцов архитектурной и археологической древесины. В работе Björklund и соавт. [2014] было показано, что именно ΔBI (Δ = разница (контраст) между плотностью поздней и ранней древесины) сопоставима с MXD и пригодна для использования в дендроклиматологических реконструкциях.

Выводы

Результаты нашего исследования показывают:

1. Различные параметры годовичных колец реагируют на различные климатические факторы.
2. Ширина ранней древесины и ширина годовичного кольца положительно коррелируют с осадками февраля, мая, июня и отрицательно – с температурой летних месяцев прошлого года.
3. Ширина поздней древесины реагирует на осадки июля текущего года и температуры марта, мая и июля. Этот параметр может быть использован для реконструкции осадков июля на Соловецких островах.
4. Климатическая функция отклика оптической плотности поздней древесины существенно отличается от других параметров высокими коэффициентами корреляции с температурой, а также более продолжительным периодом: она зависит от температуры (апрель–август). Эта корреляция, кроме того, более устойчива во времени. Благодаря этому именно оптическая плотность поздней древесины сосны обыкновенной является подходящим параметром для создания палеоклиматической реконструкции на Соловецком архипелаге и в близких по физико-географически и климатическим условиям районах.

Список источников

- Богуславский Г.А. Острова Соловецкие: очерки. Архангельск : Северо-Западное книжное изд-во, 1966. 173 с.
- Ваганов Е.А., Шнятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике. Новосибирск : Наука, 1996. 246 с.
- Долгова Е.А., Соломина О.Н., Мацковский В.В., Добрянский А.С., Семеняк Н.С., Шпунт С.С. Пространственная изменчивость прироста сосны на Соловецких островах // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 2. С. 41–50.
- Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В. Леса Соловецкого архипелага. Архангельск : СОЛТИ, 2009. 244 с.
- Колосова Г.Н. Природно-географический анализ исторических территорий: Соловецкий архипелаг. Труды Соловецкого отряда Морской арктической комплексной экспедиции. М. : РНИИ КППН, 1999. 111 с.
- Кононов Ю.М. Пространственные особенности температурного режима теплого сезона в пределах материковой части Российской Арктики в течение последних 500 лет // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2018. № 2. С. 48–58.
- Ловелиус Н.В., Соболев А.Н., Феклистов П.А. Черты единства в приросте сосны и ели на Соловецком архипелаге и факторы среды // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2012. № 4. С. 262–267.
- Мацковский В.В. Климатический сигнал в ширине годовичных колец хвойных деревьев на севере и в центре европейской территории России. М. : ГЕОС, 2013. 148 с.
- Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю.Г. Шварцмана и И.Н. Болотова. Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2007. 184 с.
- Соболев А.Н., Феклистов П.А. Структура, состояние и характер роста древостоев основных лесообразующих пород Соловецкого архипелага // Соловецкий сборник. Вып. 7. Архангельск, 2011. С. 76–88.
- Соломина О.Н., Мацковский В.В., Жуков Р.С. Дендрохронологические «летописи». «Вологда» и «Соловки» как источник данных о климате последнего тысячелетия // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439, № 2. С. 1104–1109.
- Шнятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. I: Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации : учеб.-метод. пособие. Красноярск : КрасГУ, 2000. 80 с.

- Anchukaitis K.J., Wilson R., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E.R., D'Arrigo R.** Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions // *Quaternary Science Reviews*. 2017. V. 163. P. 1–22.
- Arbellay E., Jarvis I., Chavardès R.D., Daniels L.D., Stoffel M.** Tree-ring proxies of larch bud moth defoliation: latewood width and blue intensity are more precise than tree-ring width // *Tree Physiology*. 2018. V. 38. No. 8. P. 1237–1245.
- Beck P.S., Andreu-Hayles L., D'Arrigo R., Anchukaitis K.J., Tucker C.J., Pinzón, J.E., Goetz S.J.** A large-scale coherent signal of canopy status in maximum latewood density of tree rings at arctic treeline in North America // *Global and Planetary Change*. 2013. V. 100. P. 109–118.
- Björklund J.A., Gunnarson B.E., Seftigen K., Esper J., Linderholm H.W.** Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information // *Climate of the Past*. 2014. V. 10 (2). P. 877–885.
- Björklund J., Gunnarson B.E., Seftigen K., Zhang P., Linderholm H.W.** Using adjusted blue intensity data to attain high-quality summer temperature information: A case study from Central Scandinavia // *The Holocene*. 2015. V. 25 (3). P. 547–556.
- Björklund J., Seftigen K., Schweingruber F., Fonti P., von Arx G., Bryukhanova M.V.** Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers // *New Phytologist*. 2017. V. 216 (3). P. 728–740.
- Björklund J.A., Gunnarson B.E., Krusic P.J., Grudd H., Josefsson T., Östlund L., Linderholm H.W.** Advances towards improved low-frequency tree-ring reconstructions, using an updated *Pinus sylvestris* L. MXD network from the Scandinavian Mountains // *Theoretical and applied climatology*. 2013. V. 113 (3). P. 697–710.
- Briffa K., Jones P.D.** Basic chronology statistics and assessment, in: *Methods of Dendrochronology // Applications in the Environmental Sciences*. H. 137–152. doi: 10.1007/978-94-015-7879-0
- Briffa K.R.** Basic chronology statistics and assessment // *Methods of dendrochronology*. 1990.
- Briffa K.R.** A 1,400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia // *Nature*. 1990. V. 346. P. 434–439.
- Briffa K.R., Schweingruber F., Jones P., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.J., Shiyatov S.G., Vaganov E.A.** Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes // *Nature*. 1998. V. 391, No. 6668. P. 678–682.
- Briffa K.R., Osborn T., Schweingruber F.** Large-scale temperature inferences from tree rings: a review // *Global and planetary change*. 2004. V. 40. P. 11–26.
- Campbell R., McCarroll D., Loader N.J., Grudd H., Robertson I., Jalkanen R.** Blue intensity in *Pinus sylvestris* tree-rings: Developing a new palaeoclimate proxy // *The Holocene*. 2007. V. 17 (6). P. 821–828.
- Buckley B.M., Hansen K.G., Griffin K.L., Schmiege S., Oelkers R., D'Arrigo R.D.** Blue intensity from a tropical conifer's annual rings for climate reconstruction: An ecophysiological perspective // *Dendrochronologia*. 2018. V. 50. P. 10–22.
- Bunn A.G.** A dendrochronology program library in R (dplR) // *Dendrochronologia*. 2008. V. 26 (2). P. 115–124.
- Clauson M.L., Wilson J.B.** Comparison of video and x-ray for scanning wood density // *Forest products journal (USA)*. 1991.
- Cook E.R., Seager R., Kushnir Y., Briffa K.R., Büntgen U., Frank D., Krusic P.J., Tegel W., van der Schrier G., Andreu-Hayles L., Baillie M., Baittinger C., Bleicher N., Bonde N., Brown D., Carrer M., Cooper R., Čufar K., Dittmar C., Esper J., Griggs C., Gunnarson B., Günther B., Gutierrez E., Haneca K., Helama S., Herzig F., Heussner K.-U., Hofmann J., Janda P., Kontić R., Köse N., Kyncl T., Levanič T., Linderholm H., Manning S., Melvin T.M., Miles D., Neuwirth B., Nicolussi K., Nola P., Panayotov M., Popa I., Rothe A., Seftigen K., Seim A., Svarva H., Svoboda M., Thun T., Timonen M., Touchan R., Trotsiuk V., Trouet V., Walder F., Ważny T., Wilson R., Zang C.** Old World megadroughts and pluvials during the Common Era // *Science Advances*. 2015. V. 1 (10). P. 30–46.
- Cook E.R., Solomina O., Matkovsky V., Cook B.I., Agafonov L., Berdnikova A., Kuznetsova V.** The European Russia Drought Atlas (1400–2016 CE) // *Climate Dynamics*. 2020. V. 54 (3). P. 2317–2335.
- Dannenberg M.P., Wise E.K.** Seasonal climate signals from multiple tree ring metrics: A case study of *Pinus ponderosa* in the upper Columbia River Basin // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2016. V. 121. P. 1178–1189.
- Dolgov E.** June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data // *Dendrochronologia*. 2016. V. 39. P. 17–23.
- Düthorn E., Schneider L., Günther B., Gläser S., Esper J.** Ecological and climatological signals in tree-ring width and density chronologies along a latitudinal boreal transect // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2016. V. 31, No. 8. P. 750–757.
- Esper J., Frank D.** Divergence pitfalls in tree-ring research // *Climatic Change*. 2009. V. 94 (3). P. 261–266.
- Esper J., Frank D.C., Timonen M., Zorita E., Wilson R.J.S., Luterbacher J.** Orbital forcing of tree-ring data // *Nature Climate Change*. 2012. V. 2 (12). P. 862–866.
- Esper J., Düthorn E., Krusic P.J., Timonen M., Büntgen U.** Northern European summer temperature variations over the Common Era from integrated tree-ring density records // *Journal of Quaternary Science*. 2014. V. 29 (5). P. 487–494.
- Esper J., Schneider L., Smerdon J.E., Schöne B.R., Büntgen U.** Signals and memory in tree-ring width and density data // *Dendrochronologia*. 2015. V. 35. P. 62–70.
- Esper J., George S.S., Anchukaitis K., D'Arrigo R., Ljungqvist F.C., Luterbacher J.** Large-scale, millennial-length temperature reconstructions from tree-rings // *Dendrochronologia*. 2018. V. 50. P. 81–90.
- Frank D., Esper J.** Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps // *Dendrochronologia*. 2005. V. 22 (2). P. 107–121.
- Fritts H.C.** Growth-rings of trees: their correlation with climate // *Science*. 1966. V. 154 (3752). P. 973–979.
- Fuentes G., Schweingruber F.H., Bartholin T., Schaur E., Briffa K.R.** Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland) // *Boreas*. 1988. V. 17, No. 4. P. 559–566.
- Fuentes M., Salo R., Björklund J., Seftigen K., Zhang P., Gunnarson B., Linderholm H.W.** A 970-year-long summer temperature reconstruction from Rogen, west-central Sweden, based on blue intensity from tree rings // *The Holocene*. 2018. V. 28 (2). P. 254–266.
- Grudd H.A., Briffa K.R., Karlén W., Bartholin T.S., Jones P.D., Kromer B.** 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales // *The Holocene*. 2002. V. 12 (6). P. 657–665.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.** Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset // *Int. J. of Climatology*. 2014. V. 34 (3). P. 623–642.

- Helama S., Arentoft B.W., Collin-Haubensak O., Hyslop, M.D., Brandstrup C.K., Mäkelä, H.M., Wilson R.** Dendroclimatic signals deduced from riparian versus upland forest interior pines in North Karelia, Finland // *Ecological Research*. 2013. V. 28, No. 6. P. 1019–1028.
- Hellman L., Agafonov L., Ljungqvist F.C., Churakova O., Duthorn E., Esper J., Büntgen U.** Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest // *Environmental Research Letters*. 2016. V. 11, No. 7. P. 074021.
- Holmes R.L.** Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bulletin*. 1983. V. 43. P. 69–78.
- Guiot J.** The bootstrapped response functions. 1991.
- Kaczka R.J., Spyt B., Janecka K., Musiol R.** The blue intensity proxy for >400 years growing season temperature reconstruction from the Tatra Mountains // *TRACE*. 2017. V. 15. P. 23–30.
- Kaczka R.J., Spyt B., Janecka K., Beil I., Büntgen U., Scharnweber T.** Different maximum latewood density and blue intensity measurements techniques reveal similar results // *Dendrochronologia*. 2018. V. 49. P. 94–101.
- Larsson L.** CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder/Cdendro package version 7.6. 2013. URL: <http://www.cybis.se/forfun/dendro/>
- Linderholm H.W., Björklund J., Seftigen K., Gunnarson B.E., Fuentes M.** Fennoscandia revisited: A spatially improved tree-ring reconstruction of summer temperatures for the last 900 years // *Climate Dynamics*. 2015. V. 45 (3–4). P. 933–947.
- Ljungqvist F.C., Seim A., Krusic P.J., González-Rouco J.F., Werner J.P., Cook E.R., Büntgen U.** European warm-season temperature and hydroclimate since 850 CE // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14, No. 8. P. 084015.
- Ljungqvist F.C., Piermattei A., Seim A., Krusic P.J., Büntgen U., He M., Esper J.** Ranking of tree-ring based hydroclimate reconstructions of the past millennium // *Quaternary Science Reviews*. 2020. V. 230. P. 106074.
- Meko D.M., Baisan C.H.** Pilot study of latewood-width of conifers as an indicator of variability of summer rainfall in the North American monsoon region // *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2001. V. 21, Iss. 6. P. 697–708.
- McCarroll D., Pettigrew E., Luckman A., Guibal F., Edouard J.L.** Blue reflectance provides a surrogate for latewood density of high-latitude pine tree rings // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2002. V. 34, No. 4. P. 450–453.
- McCarroll D., Loader N.J., Jalkanen R., Gagen M.H., Grudd H., Gunnarson B.E.** A 1200-year multiproxy record of tree growth and summer temperature at the northern pine forest limit of Europe // *The Holocene*. 2013. V. 4. P. 471–484.
- Mills C.M., Crone A., Wood C., Wilson R.** Dendrochronologically dated pine buildings from Scotland: The SCOT2K Native Pine Dendrochronology Project // *Vernacular Architecture*. 2017. V. 48 (1). P. 23–43.
- Rydval M., Larsson L.Å., McGlynn L., Gunnarson B.E., Loader N.J., Young G.H., Wilson R.** Blue intensity for dendroclimatology: Should we have the blues? Experiments from Scotland // *Dendrochronologia*. 2014. V. 32 (3). P. 191–204.
- Rydval M., Gunnarson B.E., Loader N.J., Cook E.R., Druckenbrod D.L., Wilson R.** Spatial reconstruction of Scottish summer temperatures from tree rings // *International Journal of Climatology*. 2017a. V. 37 (3). P. 1540–1556.
- Rydval M., Loader N.J., Gunnarson B.E., Druckenbrod D.L., Linderholm H.W., Moreton S.G.** Reconstructing 800 years of summer temperatures in Scotland from tree rings // *Climate Dynamics*. 2017b. V. 49 (9–10). P. 2951–2974.
- Rydval M., Druckenbrod D.L., Svoboda M., Trotsiuk V., Janda P., Mikoláš M.** Influence of sampling and disturbance history on climatic sensitivity of temperature-limited conifers // *The Holocene*. 2018. V. 28 (10). P. 1574–1587.
- Seftigen K., Fuentes M., Ljungqvist F.C., Björklund J.** Using Blue Intensity from drought-sensitive *Pinus sylvestris* in Fennoscandia to improve reconstruction of past hydroclimate variability // *Climate Dynamics*. 2020. V. 55. P. 579–594.
- Schweingruber F.H., Fritts H.C., Bräker O.U., Drew L.G., Schär E.** The X-ray technique as applied to dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin*. 1978.
- Schweingruber F.H., Briffa K.R., Nogler P.** A tree-ring densitometric transect from Alaska to Labrador // *International Journal of Biometeorology*. 1993. V. 37 (3). P. 151–169.
- Schweingruber F., Fritz H.** Tree rings and environment: dendroecology. Paul Haupt AG Bern, 1996.
- Schweingruber F.H., Shiyatov S.G., Shishov V.** Long-term climatic changes in the Arctic region of the Northern Hemisphere // *Doklady Earth Sciences*. 2000. V. 375, No. 8. P. 1314–1317.
- Schweingruber F.H.** Tree rings: basics and applications of dendrochronology. 2012. Springer Science & Business Media.
- Sheppard P.R., Graumlich L.J., Conkey L.E.** Reflected-light image analysis of conifer tree-rings for reconstructing climate // *The Holocene*. 1996. V. 6 (1). P. 62–68.
- Tene A., Tobin B., Dyckmans J., Ray D., Black K., Nieuwenhuis M.** Assessment of tree response to drought: Validation of a methodology to identify and test proxies for monitoring past environmental changes in trees // *Tree Physiology*. V. 201131 (3). P. 309–322.
- Trachsel M., Kamenik C., Grosjean M., McCarroll D., Moberg A., Brázdil R.** Multi-archive summer temperature reconstruction for the European Alps, AD 1053–1996 // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 46. P. 66–79.
- Wigley T.M., Briffa K.R., Jones P.D.** On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1984. V. 23, No. 2. P. 201–213.
- Wilson R.J., Esper J., Luckman B.H.** Utilising historical tree-ring data for dendroclimatology: A case study from the Bavarian Forest, Germany // *Dendrochronologia*. 2004. V. 21 (2). P. 53–68.
- Wilson R., Loader N.J., Rydval M., Patton H., Frith A., Mills C.M., Gunnarson B.E.** Reconstructing Holocene climate from tree rings: The potential for a long chronology from the Scottish Highlands // *The Holocene*. 2012. V. 22 (1). P. 3–11.
- Wilson R., Rao R., Rydval M., Wood C., Larsson L.Å., Luckman B.H.** Blue intensity for dendroclimatology: The BC blues: A case study from British Columbia, Canada // *The Holocene*. 2014. V. 24 (11). P. 1428–1438.
- Wilson R., Anchukaitis K., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E., D'Arrigo R.** Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long-term context // *Quaternary Science Reviews*. 2016. V. 134. P. 1–18.
- Wilson R., D'Arrigo R., Andreu-Hayles L., Oelkers R., Wiles G., Anchukaitis K., Davi N.** Experiments based on blue intensity for reconstructing North Pacific temperatures along the Gulf of Alaska // *Climate of the Past*. 2017a. V. 13 (8). P. 1007–1022.
- Wilson R., Wilson D., Rydval M., Crone A., Büntgen U., Clark S.** Facilitating tree-ring dating of historic conifer timbers using Blue Intensity // *Journal of Archaeological Science*. 2017b. V. 78. P. 99–111.

- Yanosky T.M., Robinove C.J.** Digital image measurement of the area and anatomical structure of tree rings // Canadian Journal of Botany. 1986. V. 64 (12). P. 2896–2902.
- Yanosky T.M., Robinove C.J., Clark R.G.** Progress in the image analysis of tree rings. 1986.
- Zang C., Biondi F.** Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relations // Ecography. 2015. V. 38, No. 4. P. 431–436.

References

- Boguslavskiy G.A. *Ostrova Solovetskie: ocherki* [The Solovetsky Islands: Essays]. Arkhangelsk: Severo-Zapadnoe knizhnoe izd-vo, 1966. 173 p. In Russian
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. *Dendroklimaticheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoy subarktike* [Dendroclimatic study in Ural-Siberian Subarctic]. Novosibirsk: Novosibirskiy filial FGUP "Akademicheskoy nauchno-izdatel'skiy i knigorasprostranitel'skiy tsentr "Nauka" 1996. 246p. In Russian
- Dolgova E.A., Solomina O.N., Matkovskiy V.V., Dobryanskiy A.S., Semenyak N.S., Shpunt S.S. Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2019. No. 2. pp. 41–50. In Russian
- Ipatov L.F., Kosarev V.P., Prourzin L.I., Torkhov S.V. *Lesa Solovetskogo arhipelaga* [Forests of the Solovetsky Archipelago] Arkhangelsk: GUP "SOLTP", 2009. 244 p. In Russian
- Kolosova G.N. *Prirodno-geograficheskoy analiz istoricheskikh territoriy: Solovetskiy arhipelag. Trudy Solovetskogo otryada Morskoy arkticheskoy kompleksnoy ekspeditsii* [Natural-geographical analysis of historical territories: the Solovetsky archipelago. Proceedings of the Solovetsky Detachment of the Marine Arctic Complex Expedition]. Moscow: RNII KPN, 1999. 111 p. In Russian
- Kononov Yu.M. Regional features of the warm season temperature regime within the continental part of the Russian Arctic during the last 500 years // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2018. No. 2. pp. 48–58. In Russian
- Lovelius N.V., Sobolev A.N., Feklistov P.A. Features unity in the growth of pine and spruce at Solovetsky Archipelago and the environmental factors // "Society. Environment. Development" ("TERRA HUMANA"). 2012. No. 4. pp. 262–267. In Russian
- Matkovskiy V.V. *Klimaticheskoy signal v shirine godichnykh kolets khvoy nykh derev'ev na severe i v tsentre evropeyskoy territorii Rossii* [Climate signal in the tree-ring width of coniferous trees in the north and in the center of the European territory of Russia]. Moscow: GEOS, 2013. 148 p. In Russian
- Prirodnaya sreda Solovetskogo arhipelaga v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [The natural environment of the Solovetsky archipelago in a changing climate]. Editors: Yu.G. Shvartsmana, I.N. Bolotova. Ekaterinburg: Izd-vo UrO RAS, 2007. 184 p. In Russian
- Sobolev A.N., Feklistov P.A. *Struktura, sostoyanie i kharakter rosta drevostoev osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Solovetskogo arhipelaga* [Structure, state and nature of growth of forest stands of the main forest-forming species of the Solovetsky Archipelago] // Solovetskiy sbornik. Vyp. 7. Arkhangelsk, 2011. pp. 76–88. In Russian
- Solomina O.N., Matkovskiy V.V., Zhukov R.C. Tree-ring chronicles "Vologda" and "Solovki" as a source of the data on climatic of the last millennium // Doklady of Russian Academy of Sciences, V. 439, No. 2, pp. 1104–1109. In Russian
- Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa B.C., Naurzbaev M.M., Khantemirov P.M. *Metody dendrokronologii. Ch. I. Osnovy dendrokronologii. Sbor i polucheniye drevnesno-kol'tsevoy informatsii: Uchebno-metodich. posobie*. [Methods of dendrochronology. Part I. Fundamentals of dendrochronology. Collecting and obtaining tree-ring information: Educational and methodical tutorial] Krasnoyarsk: KrasGU, 2000. 80 p. In Russian
- Anchukaitis K.J., Wilson R., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E.R., D'Arrigo R. Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions // Quaternary Science Reviews. 2017. V. 163. pp. 1–22.
- Arbellay E., Jarvis I., Chavardès R. D., Stoffel M. Tree-ring proxies of larch bud moth defoliation: latewood width and blue intensity are more precise than tree-ring width // Tree Physiology. 2018. V. 38. No. 8. pp. 1237–1245.
- Beck P.S., Andreu-Hayles L., D'Arrigo R., Anchukaitis K. J., Tucker C. J., Pinzón, J. E., Goetz S. J. A large-scale coherent signal of canopy status in maximum latewood density of tree rings at arctic treeline in North America // Global and Planetary Change. 2013. V. 100. pp. 109–118.
- Björklund J.A., Gunnarson B.E., Seftigen K., Esper J., Linderholm H.W. Blue intensity and density from northern Fennoscandian tree rings, exploring the potential to improve summer temperature reconstructions with earlywood information // Climate of the Past. V. 10 (2). pp. 877–885.
- Björklund J., Gunnarson B.E., Seftigen K., Zhang P., Linderholm H.W. Using adjusted blue intensity data to attain high- quality summer temperature information: A case study from Central Scandinavia // The Holocene. 2015. V. 25 (3). pp. 547–556.
- Björklund J., Seftigen K., Schweingruber F., Fonti P., von Arx G., Bryukhanova M.V. Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers // New Phytologist. 2017. V. 216 (3). pp. 728–740.
- Björklund J.A., Gunnarson B.E., Krusic P.J., Grudd H., Josefsson T., Östlund L., Linderholm H.W. Advances towards improved low-frequency tree-ring reconstructions, using an updated Pinus sylvestris L. MXD network from the Scandinavian Mountains // Theoretical and Applied Climatology. 2013. V. 113. No. 3. pp. 697–710.
- Briffa K., Jones P.D. Basic chronology statistics and assessment, in: Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. pp. 137–152. doi: 10.1007/978-94-015-7879-0
- Briffa K.R. Basic chronology statistics and assessment // Methods of Dendrochronology. 1990.
- Briffa K.R. A 1,400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia // Nature. 1990. V. 346. pp. 434–439.
- Briffa K., Schweingruber F., Jones P., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.J., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes // Nature. 1998. V. 391. No. 6668. pp. 678–682.
- Briffa K.R., Osborn T., Schweingruber F. Large-scale temperature inferences from tree rings: a review // Global and Planetary Change. 2004. V. 40. pp. 11–26.
- Campbell R., McCarroll D., Loader N.J., Grudd H., Robertson I., Jalkanen R. Blue intensity in Pinus sylvestris tree-rings: Developing a new palaeoclimate proxy // The Holocene. 2007. V. 17(6). pp. 821–828.

- Buckley B.M., Hansen K.G., Griffin K.L., Schmiede S., Oelkers R., D'Arrigo R.D. Blue intensity from a tropical conifer's annual rings for climate reconstruction: An ecophysiological perspective // *Dendrochronologia*. 2018. V. 50. pp. 10–22.
- Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR) // *Dendrochronologia*. 2008. V. 26 (2). pp. 115–124.
- Clauson M.L., Wilson J.B. Comparison of video and x-ray for scanning wood density // *Forest products journal (USA)*. 1991.
- Cook E.R., Seager R., Kushnir Y., Briffa K.R., Buntgen U., Frank D., Krusic P.J., Tegel W., van der Schrier G., Andreu-Hayles L., Baillie M., Baittinger C., Bleicher N., Bonde N., Brown D., Carrer M., Cooper R., Čufar K., Dittmar C., Esper J., Griggs C., Gunnarson B., Günther B., Gutierrez E., Haneca K., Helama S., Herzig F., Heussner K.-U., Hofmann J., Janda P., Kontic R., Köse N., Kyncl T., Levanič T., Linderholm H., Manning S., Melvin T.M., Miles D., Neuwirth B., Nicolussi K., Nola P., Panayotov M., Popa I., Rothe A., Seftigen K., Seim A., Svarva H., Svoboda M., Thun T., Timonen M., Touchan R., Trotsiuk V., Trouet V., Walder F., Wazny T., Wilson R., Zang C. Old World megadroughts and pluvials during the Common Era // *Science Advances*. 2015. 1 (10). pp. 30–46.
- Cook E.R., Solomina O., Matskovsky V., Cook B.I., Agafonov L., Berdnikova A., Kuznetsova V. The European Russia Drought Atlas (1400–2016 CE) // *Climate Dynamics*. 2020. V. 54 (3). pp. 2317–2335.
- Dannenber M.P., Wise E.K. Seasonal climate signals from multiple tree ring metrics: A case study of *Pinus ponderosa* in the upper Columbia River Basin // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2016. V. 121. pp. 1178–1189.
- Dolgova E. June–September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data // *Dendrochronologia*. 2016. V. 39. pp. 17–23.
- Düthorn E., Schneider L., Günther B., Gläser S., Esper J. Ecological and climatological signals in tree-ring width and density chronologies along a latitudinal boreal transect // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2016. V. 31. No. 8. pp. 750–757.
- Esper J., Frank D. Divergence pitfalls in tree-ring research // *Climatic Change*. 2009. V. 94(3), pp. 261–266.
- Esper J., Frank D.C., Timonen M., Zorita E., Wilson R.J.S., Luterbacher J. Orbital forcing of tree-ring data // *Nature Climate Change*. 2012. V. 2 (12). pp. 862–866.
- Esper J., Düthorn E., Krusic P.J., Timonen M., Buntgen U. Northern European summer temperature variations over the Common Era from integrated tree-ring density records // *Journal of Quaternary Science*. 2014. V. 29(5). pp. 487–494.
- Esper J., Schneider L., Smerdon J. E., Schöne B. R., Buntgen, U. Signals and memory in tree-ring width and density data // *Dendrochronologia*. 2015. V.35. pp. 62–70.
- Esper J., George S.S., Anchukaitis K., D'Arrigo R., Ljungqvist F.C., Luterbacher J. Large-scale, millennial-length temperature reconstructions from tree-rings // *Dendrochronologia*. 2018. V. 50. pp. 81–90.
- Frank D., Esper J. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps // *Dendrochronologia*. 2005. V. 22(2). pp. 107–121.
- Fritts H.C. Growth-rings of trees: their correlation with climate // *Science*. 1966. V. 154(3752). pp. 973–979.
- Fuentes G., Schweingruber F.H., Bartholin T., Schaur E., Briffa K.R. Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland) // *Boreas*. 1988. V. 17. No. 4. pp. 559–566.
- Grudd H.A., Briffa K. R., Karlén W., Bartholin T.S., Jones P.D., Kromer B. 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales // *The Holocene*. 2002. V. 12(6). pp. 657–665.
- Guiot J. The bootstrapped response function. 1991.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset // *Int. J. of Climatology*. 2014. V. 34 (3). pp. 623–642.
- Helama S., Arentoft B.W., Collin-Haubensak O., Hyslop, M.D., Brandstrup C.K., Mäkelä H.M., Wilson R. Dendroclimatic signals deduced from riparian versus upland forest interior pines in North Karelia, Finland // *Ecological research*. 2013. V. 28. No. 6. pp. 1019–1028.
- Hellman L., Agafonov L., Ljungqvist F.C., Churakova O., Düthorn E., Esper J., Buntgen U. Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest // *Environmental Research Letters*. 2016. V. 11. No. 7. pp. 074021.
- Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bulletin*. 1983. V. 43. pp. 69–78.
- Kaczka R.J., Spt B., Janecka K., Musiol R. The blue intensity proxy for >400 years growing season temperature reconstruction from the Tatra Mountains // *TRACE*. 2017. V. 15. pp. 23–30.
- Kaczka R.J., Spt B., Janecka K., Beil I., Buntgen U., Scharnweber T. Different maximum latewood density and blue intensity measurements techniques reveal similar results // *Dendrochronologia*, 2018. V. 49. pp. 94–101.
- Larsson L. CooRecorder and Cdendro programs of the CooRecorder / Cdendro package version 7.6. 2013. <http://www.cybis.se/forfun/dendro/>
- Linderholm H.W., Björklund J., Seftigen K., Gunnarson B. E. Fuentes M. Fennoscandia revisited: A spatially improved tree-ring reconstruction of summer temperatures for the last 900 years // *Climate Dynamics*. 2015. V. 45(3–4). pp. 933–947.
- Ljungqvist F.C., Seim A., Krusic P.J., González-Rouco J. F., Werner J. P., Cook E. R., Buntgen U. European warm-season temperature and hydroclimate since 850 CE // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14. No. 8. P. 084015.
- Ljungqvist F.C., Piermattei A., Seim A., Krusic P.J., Buntgen U., He M., Esper J. Ranking of tree-ring based hydroclimate reconstructions of the past millennium // *Quaternary Science Reviews*. 2020. V. 230. P. 106074.
- Meko D.M., Baisan C.H. Pilot study of latewood-width of conifers as an indicator of variability of summer rainfall in the North American monsoon region // *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2001. V. 21. Iss. 6. pp. 697–708.
- McCarroll D., Pettigrew E., Luckman A., Guibal F., Edouard J. L. Blue reflectance provides a surrogate for latewood density of high-latitude pine tree rings // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2002. V. 34. No. 4. pp. 450–453.
- McCarroll D., Loader N.J., Jalkanen R., Gagen M.H., Grudd H., Gunnarson B.E. A 1200-year multiproxy record of tree growth and summer temperature at the northern pine forest limit of Europe // *The Holocene*. 2013. V. 4. pp. 471–484.
- Mills C.M., Crone A., Wood C., Wilson R. Dendrochronologically dated pine buildings from Scotland: The SCOT2K Native Pine Dendrochronology Project // *Vernacular Architecture*. 2017. V. 48(1). pp. 23–43.
- Rydval M., Larsson L.Å., McGlynn L., Gunnarson B.E., Loader N.J., Young G.H., Wilson R. Blue intensity for dendroclimatology: Should we have the blues? Experiments from Scotland // *Dendrochronologia*. 2014. V. 32 (3). pp. 191–204.

- Rydval M., Gunnarson B.E., Loader N.J., Cook E.R., Druckenbrod D.L., Wilson R. Spatial reconstruction of Scottish summer temperatures from tree rings // *International Journal of Climatology*. 2017. V. 37(3). pp. 1540–1556.
- Rydval M., Loader N.J., Gunnarson B.E., Druckenbrod D.L., Linderholm H.W., Moreton S.G. Reconstructing 800 years of summer temperatures in Scotland from tree rings // *Climate Dynamics*. 2017. V. 49(9–10). pp. 2951–2974.
- Rydval M., Druckenbrod D.L., Svoboda M., Trotsiuk V., Janda P., Mikoláš M. Influence of sampling and disturbance history on climatic sensitivity of temperature-limited conifers // *The Holocene*. 2018. V. 28(10). pp. 1574–1587.
- Seftigen K., Fuentes M., Ljungqvist F.C., Björklund J. Using Blue Intensity from drought-sensitive *Pinus sylvestris* in Fennoscandia to improve reconstruction of past hydroclimate variability // *Climate dynamics*. 2020. V. 55. pp. 579–594.
- Schweingruber F.H., Fritts H.C., Bräker O.U., Drew L.G., Schär E. The X-ray technique as applied to dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin*. 1978.
- Schweingruber F.H., Briffa K.R., Nogler P. A tree-ring densitometric transect from Alaska to Labrador // *International Journal of Biometeorology*. 1993. V. 37. No. 3. pp. 151–169.
- Schweingruber F., Fritz H. Tree rings and environment: dendroecology. Paul Haupt AG Bern, 1996.
- Schweingruber F.H., Shiyatov S.G., Shishov V. Long-term climatic changes in the Arctic region of the Northern Hemisphere // *Doklady Earth Sciences*. 2000. V. 375. No. 8. pp. 1314–1317.
- Schweingruber F.H. Tree rings: basics and applications of dendrochronology. 2012. Springer Science & Business Media.
- Sheppard P.R., Graumlich L.J., Conkey L.E. Reflected-light image analysis of conifer tree-rings for reconstructing climate // *The Holocene*. 1996. V. 6 (1). pp. 62–68.
- Tene A., Tobin B., Dyckmans J., Ray D., Black K., Nieuwenhuis M. Assessment of tree response to drought: Validation of a methodology to identify and test proxies for monitoring past environmental changes in trees // *Tree physiology*. V. 201131 (3). pp. 309–322.
- Trachsel M., Kamenik C., Grosjean M., McCarroll D., Moberg A., Brázdil R. Multi-archive summer temperature reconstruction for the European Alps, AD 1053–1996 // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 46. pp. 66–79.
- Wigley T.M., Briffa K.R., Jones P.D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1984. V. 23. No. 2. pp. 201–213.
- Wilson R.J., Esper J., Luckman B.H. Utilising historical tree-ring data for dendroclimatology: A case study from the Bavarian Forest, Germany // *Dendrochronologia*. 2004. V. 21 (2). pp. 53–68.
- Wilson R., Loader N.J., Rydval M., Patton H., Frith A., Mills C.M., Gunnarson B.E. Reconstructing Holocene climate from tree rings: The potential for a long chronology from the Scottish Highlands // *The Holocene*. 2012. V. 22 (1). pp. 3–11.
- Wilson R., Rao R., Rydval M., Wood C., Larsson L. Å., Luckman B. H. Blue intensity for dendroclimatology: The BC blues: A case study from British Columbia, Canada // *The Holocene*. 2014. V. 24 (11). pp. 1428–1438.
- Wilson R., Anchukaitis K., Briffa K.R., Büntgen U., Cook E., D'Arrigo, R. Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long-term context // *Quaternary Science Reviews*. 2016. V. 134. pp. 1–18.
- Wilson, R., D'Arrigo R., Andreu-Hayles L., Oelkers R., Wiles G., Anchukaitis K., Davi N. Experiments based on blue intensity for reconstructing North Pacific temperatures along the Gulf of Alaska // *Climate of the Past*. 2017. V. 13 (8). pp. 1007–1022.
- Wilson R., Wilson D., Rydval M., Crone A., Büntgen U., Clark S. Facilitating tree-ring dating of historic conifer timbers using Blue Intensity // *Journal of Archaeological Science*. 2017. V. 78. pp. 99–111.
- Yanosky T. M., Robinove C. J. Digital image measurement of the area and anatomical structure of tree rings // *Canadian Journal of Botany*. 1986. V. 64 (12). pp. 2896–2902.
- Yanosky T.M., Robinove C.J., Clark R.G. Progress in the image analysis of tree rings. 1986.
- Zang C., Biondi F. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relations // *Ecography*. 2015. V. 38. No. 4. pp. 431–436.

Информация об авторах:

Семеняк Н.С., младший научный сотрудник, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: semenyak@igras.ru

Соломина О.Н., доктор географических наук, директор, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: solomina@igras.ru

Долгова Е.А., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: dolgova@igras.ru

Мацковский В.В., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт географии РАН, Москва, Россия.

E-mail: matskovsky@igras.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Semenyak N.S., Junior Researcher, Institute of Geography RAS, Moscow, Russia.

E-mail: semenyak@igras.ru

Solomina O.N., Dr. Sci. (Geography), Corresponding Member of RAS, director, Institute of Geography RAS, Moscow, Russia.

E-mail: solomina@igras.ru

Dolgova E.A., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Institute of Geography RAS, Moscow, Russia.

E-mail: dolgova@igras.ru

Matskovsky V.V., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Institute of Geography RAS, Moscow, Russia.

E-mail: matskovsky@igras.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.06.2021; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 06.11.2022

The article was submitted 02.06.2022; approved after reviewing 15.09.2022; accepted for publication 06.11.2022