

ISSN 1997-1389 (Print)
ISSN 2313-5530 (Online)

**Журнал Сибирского
федерального университета
Биология**

**Journal of Siberian
Federal University
Biology**

2022 15 (2)

ISSN 1997-1389 (Print)
ISSN 2313-5530 (Online)

2022 15(2)

Журнал Сибирского федерального университета Биология

Journal of Siberian Federal University Biology

Издание индексируется Scopus (Elsevier), «Russian Science Citation Index» и «Zoological Record» на платформе «Web of Science» (Clarivate Analytics), Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлено в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, ProQuest, EBSCO (США), Google Scholar, Centre for Agriculture and Biosciences International (CABI), DOAJ, КиберЛенинка. Включено в список Высшей аттестационной комиссии «Рецензируемые научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования».

**Журнал Сибирского федерального университета. Биология.
Journal of Siberian Federal University. Biology.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *Е.С.Кравчук*. Редактор *И.А.Вейсиг*. Корректор *С.В.Хазаржан*.
Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 2. 30.06.2022. Индекс: 42325. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства: 660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, оф. 32-03.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28725 от 29.06.2007 г.,
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 24.06.2022. Формат 84x108/16. Усл. печ. л. 12,2.

Уч.-изд. л. 11,7. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 15834.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

CHIEF EDITOR

Michail Gladyshev, Corresponding Member of RAS, Professor, Institute of Biophysics SB RAS, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

SCIENCE EDITOR

Elena Kravchuk, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

EDITORIAL BOARD

- Sergey Bartsev, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Andrey Degermendzhy, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Nikolay Gaevsky, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
- Joseph Gitelson, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Viktor Glupov, Institute of Systematics and Ecology of Animals SB RAS, Novosibirsk, Russia
- Malcolm Hughes, University of Arizona, Tucson, USA
- Mikhail Karpinsky, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia
- Valentina Kratasyuk, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
- John Lee, University of Georgia, Athens, USA
- Elena Muratova, Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Akira Osawa, Kyoto University, Kyoto, Japan
- Vitaliy Semenchenko, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, Belarus
- Nadezhda Sushchik, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Sabu Thomas, Mahatma Gandhi University, Kottayam, India
- Aristidis Tsatsakis, University of Crete, Heraklion, Greece
- Eugene Vaganov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
- Tatiana Volova, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Egor Zadereev, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

CONTENTS

Preface by the editors of the thematic issue "Dendrochronological research"	147
Andrey A. Grigoriev, Yulia V. Shalaumova, Elizaveta V. Bolotnik, Dmitry S. Balakin and Pavel A. Moiseev Holistic Assessment of the Climatogenic Transformation of Alpine Mountain Forest Ecosystems in the Southern Urals (a Case Study of Iremel Massif)	148
Marina A. Gurskaya Influence of Atmospheric Circulation on the Formation of Light Rings in Larches in the Subarctic Siberia	167
Anastasia V. Demina, Dina F. Zhirnova, Liliana V. Belokopytova, Keshav K. Upadhyay and Elena A. Babushkina Detailing the Climatic Response of Wood Anatomical Traits and Xylogenesis Phenology of Scots Pine in the Forest-Steppes of Southern Siberia.....	183
Natalia V. Rygalova Construction of Centuries-Old Tree-Ring Chronologies of <i>Pinus sylvestris</i> L. for the Forest-Steppe and Steppe Zones of the South of Western Siberia	202
Svetlana A. Nikolaeva, Dmitry A. Savchuk, Alexander S. Kuznetsov and Elena E. Timoshok Dendroindication of Past Fires in the Upper Reaches of the Aktru River (the Altai Mountains).....	221
Arina A. Vyukhina and Marina A. Gurskaya Dendroclimatic Potential of Blue Intensity-Based Chronologies of Northern Fennoscandia Scots Pine.....	244
Vladimir V. Kukarskih, Nadezhda M. Devi, Maksim O. Bubnov, Anna V. Komarova and Leonid I. Agafonov Urban Heat Island of Ekaterinburg: Does It Affect Radial Growth of the Scots Pine?.....	264
Sergey G. Andreev, Alexandr A. Ayurzhanayev, Eduard A. Batotsyrenov, Andrey G. Suprunenko, Sayga A. Sat, Bator V. Sodnomov and Vladimir N. Chernykh Dendrochronological Study of a 19th-Century Log Cabin (the Ethnographic Museum of Peoples of Transbaikalia, Buryatia)	279

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редакторов тематического выпуска «Дендрохронологические исследования».....	147
А. А. Григорьев, Ю. В. Шалаумова, Е. В. Болотник, Д. С. Балакин, П. А. Моисеев Комплексная оценка климатогенной трансформации высокогорных лесных экосистем Южного Урала (на примере массива Ирмель)	148
М. А. Гурская Влияние атмосферной циркуляции на формирование светлых колец в древесине лиственницы в Сибирской Субарктике.....	167
А. В. Демина, Д. Ф. Жирнова, Л. В. Белокопытова, К. К. Упадхай, Е. А. Бабушкина Детализация климатического отклика анатомических параметров древесины и фенологии ксилогенеза сосны обыкновенной в лесостепях юга Сибири.....	183
Н. В. Рыгалова Построение многовековых древесно-кольцевых хронологий <i>Pinus sylvestris</i> L. для лесостепной и степной зон юга Западной Сибири	202
С. А. Николаева, Д. А. Савчук, А. С. Кузнецов, Е. Е. Тимошок Дендроиндикация прошлых пожаров в верховьях р. Актру (Горный Алтай)	221
А. А. Вьюхина, М. А. Гурская Интенсивность отражения синего (blue intensity): дендроклиматический потенциал сосны, произрастающей на севере Фенноскандии	244
В. В. Кукарских, Н. М. Дэви, М. О. Бубнов, А. В. Комарова, Л. И. Агафонов Городской остров тепла г. Екатеринбурга: есть ли влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной?.....	264
С. Г. Андреев, А. А. Аюржанаев, Э. А. Батоцыренов, А. Г. Супруненко, С. А. Сат, Б. В. Содномов, В. Н. Черных Дендрохронологическое исследование этапного амбара XIX в. (Этнографический музей народов Забайкалья, г. Улан-Удэ).....	279

Предисловие редакторов тематического выпуска «Дендрохронологические исследования»

В сентябре 2021 г. в Хакасском техническом институте – филиале Сибирского федерального университета (г. Абакан) прошла IV Международная дендрохронологическая конференция «РусДендро-2021». Мероприятие впервые было проведено в смешанном формате: очно и дистанционно (on-line), что существенно расширило географию участников: Абакан, Екатеринбург, Тюмень, Красноярск, Барнаул, Чита, Сыктывкар, Уфа, Воронеж, Иркутск, Кызыл, Шушенское, Улан-Удэ, Казань, Томск, Новосибирск, Москва, Гёттинген (Германия), Тусон (США), Кембридж (Великобритания), Сарагоса (Испания), Вагенинген (Нидерланды). Основной целью работы конференции являлось представление результатов исследований в области дендрохронологии и содействие сотрудничеству специалистов России и сопредельных стран в этой области знаний.

Было заслушано 54 доклада по различным направлениям. На секции дендроклиматологии участники обсудили вопросы реконструкции осадков, индексов засухи и аномальных погодных явлений, трансформации и сдвига границ экосистем при изменении климата, влияния крупных водоемов на климатический отклик. Широко были представлены исследования в области дендрэкологии, отражающие влияние на прирост деревьев разнообразных факторов: биотических (включая вспышки размножения вредителей) и абиотических, в том числе пожаров, рекреации, геохимических и лесорастительных условий, снеговой нагрузки. Несколько докладов было посвящено построению многовековых древесно-кольцевых хронологий, в том числе для не охваченных ранее семиаридных регионов. Мультидисциплинарный подход был продемонстрирован в докладах по дендроархеологии и дендрогеномике. По направлению анатомии древесины был рассмотрен вклад в формирование структуры годичных колец внутренних взаимосвязей и внешних условий – от состава насаждения до атмосферной циркуляции. Участниками мероприятия также были предложены новые методологические разработки в области подготовки образцов, анализа и моделирования.

Р.М. Хантемиров

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дендрохронологии Института экологии растений и животных УрО РАН

Е.А. Ваганов

академик РАН, д-р биол. наук, научный руководитель Сибирского федерального университета

DOI 10.17516/1997-1389-0380

УДК 630*56:582.47:551

**Holistic Assessment of the Climatogenic Transformation
of Alpine Mountain Forest Ecosystems
in the Southern Urals
(a Case Study of Iremel Massif)**

**Andrey A. Grigoriev^{*a, b},
Yulia V. Shalaumova^c, Elizaveta V. Bolotnik^d,
Dmitry S. Balakin^a and Pavel A. Moiseev^a**

*^aInstitute of Plant and Animal Ecology
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Ekaterinburg, Russian Federation*

*^bUral State Forest Engineering University
Ekaterinburg, Russian Federation*

*^cInstitute of Industrial Ecology
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Ekaterinburg, Russian Federation*

*^dBotanical Garden of the
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Ekaterinburg, Russian Federation*

Received 03.03.2022, received in revised form 23.05.2022, accepted 17.06.2022

Abstract. Iremel Massif today is a peak of the Southern Urals with the maximum expansion of woody vegetation into the mountain tundra. As a result, the areas occupied by mountain tundra communities are considerably reduced and, hence, the biodiversity of the alpine mountain is decreased. The goal of this study is to assess the climate-driven transformation of the alpine forest ecosystems of Iremel Massif using a suite of methods. The comparison of multi-temporal topographic maps and satellite images served to establish that over the past 60 years, the continuous limits of open forests have shifted by 5.5 m/decade to the higher altitudes and 21.6 m/decade horizontally. The area of the boundary shift of the open forest was 6.97 km². For the first time, changes in the areas occupied by various types of woody vegetation in the study region were quantified based on landscape repeat photography and the WSL Monoplotting Tool software. On the northeastern slope of Bolshoy Iremel, over the past 40 years, the

© 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: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru

ORCID: 0000-0002-7446-0654 (Grigoriev A.); 0000-0002-0173-6293 (Shalaumova Y.)

area of closed forests has increased by a factor of almost 2, the area of open forests has increased by a factor of 5, the area of sparse forests has increased by a factor of 2, and the area of plots with single trees has decreased by a factor of 4. Analysis of the age structure of Siberian juniper (*Juniperus sibirica* Burgsd.) revealed that substantial expansion of that species into mountain tundra communities occurred above the upper limits of open forests from 1920 to 1930 and from 1950 to 1980. The most dramatic increase in the number of trees began only after the 1990s, and it has been continuing until today. A high correlation has been found between the number of established *J. sibirica* shrubs and the amount of precipitation in the first months of the cold season (November-January) in the previous five years (Spearman's correlation coefficient is 0.61).

Keywords: remote monitoring, landscape photography, spruce open forest, *Juniperus sibirica* Burgsd., mountain tundra, climate change, Southern Urals.

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to Prof. S. G. Shiyatov for advice during the study.

Citation: Grigoriev A. A., Shalaumova Y. V., Bolotnik E. V., Balakin D. S., Moiseev P. A. Holistic assessment of the climatogenic transformation of alpine mountain forest ecosystems in the Southern Urals (a case study of Iremel Massif). *J. Sib. Fed. Univ. Biol.*, 2022, 15(2), 148–166. DOI: 10.17516/1997-1389-0380

Комплексная оценка климатогенной трансформации высокогорных лесных экосистем Южного Урала (на примере массива Ирмель)

**А. А. Григорьев^{а, б}, Ю. В. Шалаумова^в,
Е. В. Болотник^г, Д. С. Балакин^а, П. А. Моисеев^а**

*^аИнститут экологии растений и животных УрО РАН
Российская Федерация, Екатеринбург*

*^бУральский государственный лесотехнический университет
Российская Федерация, Екатеринбург*

*^вИнститут промышленной экологии УрО РАН
Российская Федерация, Екатеринбург*

^гБотанический сад УрО РАН

Российская Федерация, Екатеринбург

Аннотация. В настоящее время массив Ирмель (Южный Урал) является одной из наиболее интенсивно зарастающих древесной и кустарниковой растительностью вершин Южного Урала. В результате данного процесса происходит значительное сокращение площадей, занятых сообществами горных тундр и, как следствие, сокращение биоразнообразия высокогорий. Целью исследования явилась оценка климатически обусловленной трансформации высокогорных лесных

экосистем массива Ирмель с помощью комплекса методов. На основе сравнения разновременных топографических карт и спутниковых изображений установлено, что за последние 60 лет сплошная граница редколесий смещалась вверх вдоль высотного градиента на 5,5 м за 10 лет, а горизонтальное продвижение сплошной границы редколесий составило 21,6 м за 10 лет. Площадь области сдвига границы редколесий составила 6,97 км². Впервые получены количественные данные об изменении площадей, занимаемых различными типами древесной растительности, для изучаемой территории на основе использования повторных ландшафтных фотоснимков и программы WSL Monoplotting Tool. Показано, что на северо-восточном склоне г. Бол. Ирмель за последние 40 лет площадь сомкнутых лесов увеличилась почти в 2 раза, редколесий – в 5 раз, редины – в 2 раза, площадь участков с одиночными деревьями сократилась в 4 раза. На основе анализа возрастной структуры установлено, что выше границы распространения редколесий в период с 1920 по 1930-е гг. и с 1950 по 1980-е гг. происходила активная экспансия *Juniperus sibirica* Burgsd. (можжевельник сибирский) в сообщества горных тундр. Наиболее массовый всплеск численности деревьев произошел только после 1990-х гг. и продолжается по настоящее время. Установлена высокая корреляционная связь между появлением *J. sibirica* и осадками начала холодного периода (ноябрь-январь) предшествующих пятилетий (коэффициент корреляции Спирмена 0,61).

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, ландшафтные фотоснимки, еловые редколесья, *Juniperus sibirica* Burgsd., горные тундры, изменение климата, Южный Урал.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность д.б.н., проф. С. Г. Шиятову за консультации при проведении исследования.

Цитирование: Григорьев, А. А. Комплексная оценка климатогенной трансформации высокогорных лесных экосистем Южного Урала (на примере массива Ирмель) / А. А. Григорьев, Ю. В. Шалаумова, Е. В. Болотник, Д. С. Балакин, П. А. Моисеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 148–166. DOI: 10.17516/1997-1389-0380

Введение

Потепление климата представляет собой неоспоримый факт, и с 1950-х гг. многие наблюдаемые изменения являются беспрецедентными в масштабах от десятилетий до тысячелетий. Произошло потепление атмосферы и океана, запасы снега и льда сократились, а уровень моря повысился (IPCC, 2021). Одной из известных и часто обсуждаемых реакций биоты на климатические изменения является смещение растительных рубежей в горных регионах (Hansson et al., 2021; Lu et al., 2021). Было показано, что под влиянием изменений условий среды в последнем столетии проис-

ходило интенсивное продвижение древесной (Hagedorn et al., 2014; Шиятов и др., 2020; Zhou et al., 2022) и кустарниковой (Grigoriev et al., 2021) растительности в тундровые экосистемы высокогорий Урала. С. Г. Шиятов с соавт. (2020) на основе сравнения 146 пар разновременных ландшафтных фотоснимков установил, что на Южном Урале происходит, вероятнее всего, наиболее интенсивная экспансия древесно-кустарниковой растительности выше в экосистемы горных тундр по сравнению с другими горными провинциями Урала. На таких вершинах, как г. Уван, г. Ягодная, г. Харитоновая и др., к настоящему времени

горные тундры полностью исчезли. Показано, что с высокой долей вероятности в ближайшем будущем исчезновение горных тундр может произойти на г. Дальний Таганай, г. Колокольня, г. Копешка, хр. Большая Сука́ и др. Это может привести к значительному обеднению биоразнообразия растительности высокогорий (Pauli et al., 2012), в частности к снижению альфа- и бета-разнообразия тундровых и луговых сообществ (Горчаковский, 1975), а также к изменению структуры высокогорного ландшафта (Горчаковский, Шиятов, 1985). В этой связи исследования динамики верхней границы распространения древесных и кустарниковых видов, а также количественная оценка изменения распределения лесопокрытых площадей в горах Южного Урала приобретают чрезвычайную актуальность.

Массив Ирмель является одним из давно изучаемых по обсуждаемой проблеме горных массивов в Уральских горах (Тюлина, 1931; Игошина, 1964; Горчаковский, 1975; Шиятов, 1982, 1983; Moiseev et al., 2004; Капралов и др., 2007; Шиятов и др., 2020). Сопоставление пар разновременных ландшафтных снимков показало, что массив Ирмель из-за пологости склонов стал одной из наиболее динамично зарастающих горных вершин Южного Урала (Шиятов и др., 2020). Отдельные возвышенности и перевалы, входящие в данный горный комплекс, полностью заросли древесно-кустарниковой растительностью во второй половине XX в. Тем не менее, несмотря на обширные исследования, к настоящему времени нет фактов и данных о характере и темпах продвижения кустарниковой растительности на массиве Ирмель, а количественные оценки сдвигов верхних границ редколесий (Капралов и др., 2007), основанные только на повторных описаниях растительности (с 1973 по 2006 г.), к настоящему времени теряют свою актуальность.

Цель настоящего исследования – с помощью комплекса методов оценить трансформацию высокогорных лесных экосистем Южного Урала (на примере массива Ирмель) и ее связи с современными изменениями климата. Для реализации цели решались следующие задачи: 1) количественно оценить сдвиги верхних границ редколесий во второй половине XX – начале XXI в.; 2) количественно оценить изменения площадей, занятых разными типами растительного покрова, на основе разновременных фотоснимков; 3) выявить и оценить экспансию кустарниковой растительности на основе анализа ее возрастной структуры.

Материал и методы

Район исследований

Исследования проводились на склонах горного массива Ирмель 54° 30–34' с.ш. и 58° 49–54' в.д. (рис. 1), образующего на Южном Урале крупную складчатую толщу горных пород с общим подъемом в центре, называемым Башкирским антиклинорием. Данный массив входит в пределы Ирмельского – Авалякского природного района со значительными абсолютными высотами (до 1600 м). Массив сложен в тектоническом отношении из немых свит, относящихся к верхнему протерозою, состоящих из кварцевых песчаников, кварцито-песчаников и слагающих их темно-серых и черных сланцев (Борисевич, 1968). Климат района исследования находится под воздействием арктических континентальных и атлантических воздушных масс. По данным метеостанции «Златоуст» (55.17306 с.ш., 59.65407 в.д., 538 м над ур.м., периоды наблюдений 1818–2015 гг. для температуры приземного воздуха и 1837–2015 гг. для осадков), средняя температура января составляет минус 15,3 °С, средняя температура июля – 16,4 °С, сумма годовых осадков 606 мм.

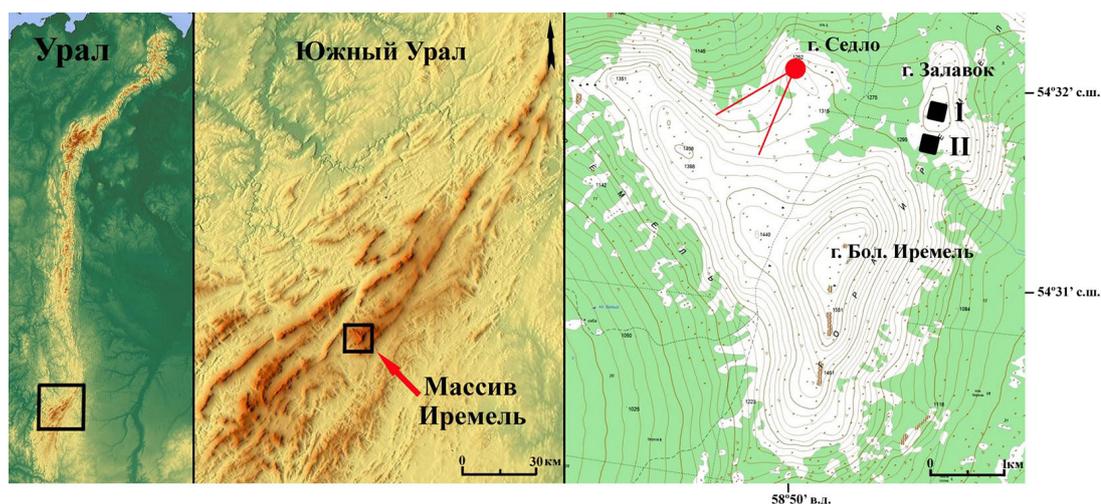


Рис. 1. Карта-схема района исследования: I и II – местоположение пробных площадей, круг с линиями – место и направление ландшафтной фотосъемки

Fig. 1. Map of the study area: I and II are the locations of study plots, the circle with rays is the place and direction of landscape photography

Почвы Ирмельского массива горно-луговые и горно-подзолистые. Горно-луговые почвы в гольцовом поясе, в свою очередь, переходят в разновидность тундровых почв (Кувшинова, 1968). П. Л. Горчаковский (1966) для данного района исследования выделяет три пояса растительности. В горно-лесном поясе, представителями которого являются *Pinus sylvestris* L. (сосна обыкновенная) (от 500 до 700 м над ур.м.), *Abies sibirica* L. (пихта сибирская) и *Picea obovata* L. (ель сибирская) (от 650 до 1250 м над ур.м.), с увеличением высоты количество деревьев *P. obovata* увеличивается с примесью *Betula pubescens* ssp. *tortuosa* Ledeb. (береза извилистая), *Populus tremula* L. (тополь дрожащий) и *Larix sibirica* Ledeb. var. *sukaczewii* (лиственница сибирская). Подгольцовый пояс (1200–1250 м над ур.м.) представлен преимущественно еловыми древостоями с березовым мелколесьем, березовым криволесьем и осоково-пушицевым болотом. Горно-тундровый пояс, находящийся выше границы леса, представлен мхами, лишайниками и доминирующим кустарнико-

вым видом *Juniperus sibirica* Burgsd. (можжевельник сибирский), формирующим локально густые заросли.

Дистанционный метод

С целью количественной оценки крупномасштабных сдвигов верхних границ редколесий (растительных сообществ с сомкнутостью крон 0,2–0,3) был проведен сравнительный анализ топографической карты 1958 г. и спутникового изображения 2020 г. для района г. Ирмель. В геоинформационной системе ArcGIS 10.8. (ESRI Inc., США) эти данные были совмещены с цифровой моделью рельефа (ЦМР) разрешения 10×10 м и закартированы пределы распространения редколесий в 1958 и 2020 гг. Оценка площади экспансии редколесий была получена с помощью модуля Spatial Statistics. Для расчета горизонтального продвижения сплошной границы редколесий (без учета обособленных островков) использовалась функция оценки евклидова расстояния от линии, обрисовывающей границу редколесий в начале ис-

следуемого периода, до линии современного распространения редколесий (Капралов и др., 2007). Вертикальное продвижение сплошной границы редколесий оценивалось по значениям ячеек цифровой модели рельефа, находящихся на линиях, очерчивающих распространение редколесий в 1958 и 2020 гг. В качестве усредненной по ячейкам растра оценки смещений верхней границы редколесий использовались медианы, так как распределения значений указанных величин отличаются от нормального (проверка проводилась с помощью критерия Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса).

Область сдвига верхней границы редколесий была разделена на участки по классам элементов рельефа (абсолютной высоте, экспозиции, крутизне склона). Были выделены высотные срезы от 400 до 1000 м над ур.м. с шагом по 100 м. Экспозиция склонов подразделялась на 8 групп по 45°: северная (С, 337,5–22,5°), северо-восточная (СВ, 22,5–67,5°) и т.д. Крутизна склонов была разбита на классы от 0 до 35° с шагом 5°. Для устранения неоднородности распределения данных по классам элементов рельефа была проведена процедура нормализации (Kharuk et al., 2010, 2018), при этом участки зоны экспансии редколесий с заданными классами высоты, экспозиции и крутизны склона соотносились со всей площадью сдвига.

Метод разновременных ландшафтных фотоснимков

При оценке изменений площадей, занятых различной степенью сомкнутости крон деревьев, был использован метод разновременных ландшафтных фотоснимков, сделанных с одних и тех же точек в разные годы (Шиятов, 1982, 1983). На основе измерений площадей, занятых древостоями различной сомкнутости на снимках разных

лет, была получена количественная оценка произошедших изменений в лесотундровом экотоне. Из потенциально контрольных точек (116 пар разновременных снимков) (Шиятов и др., 2020) была отобрана одна наиболее показательная пара снимков, для которой выполняются условия относительно ровной поверхности рельефа для анализируемого участка и хорошей идентификации контрольных точек, по которым осуществляется географическая привязка исторических и современных снимков к ЦМР и топографической карте. Местоположение места съемки фиксировалось с помощью приемника GPS на местности. Анализ повторных фотоснимков проводили с помощью программы WSL Monoplotting Tool 2.0. (Bozzini et al., 2012; McCaffrey, Hopkinson, 2017). Программа позволяет произвести географическую привязку фотографий по координатам (с масштабом не менее 20 м) с последующим выделением исследуемых объектов на ней, их количественной оценкой в программе ArcGIS. Для каждого изображения проводили калибровку камеры с учетом выбранных контрольных точек, координат места расположения камеры, фокусного расстояния, центра изображения в пиксельных координатах, а также направления, в котором проводилась съемка исследуемого объекта. Количественную оценку объектов, запечатленных на фотографиях, проводили посредством построения в программе WSL Monoplotting Tool полигонов, линий и отдельных точек, координаты которых экспортировали в программу ArcGIS. На каждом снимке согласно классификации П.Л. Горчаковского и С.Г. Шиятова (1985) были выделены следующие категории занятых древесной растительностью площадей: сомкнутый лес (сомкнутость крон деревьев более 0,4–0,5 и расстоянием между ними менее 7–10 м), редколесья (сомкнутость крон

деревьев 0,2–0,3 и расстоянием между ними от 7–10 до 20–30 м), группы деревьев (редины) (сомкнутость крон деревьев 0,05–0,1 и расстоянием между ними от 20–30 до 50–60 м), отдельные деревья среди горных тундр или лугов. В работе были использованы ландшафтные фотоснимки, сделанные С.Г. Шиятовым в 1976 г. и А. А. Григорьевым в 2016 г.

Метод высотных профилей

В июне-августе 2019 г. на южном склоне возвышенности «Залавок» был заложен высотный профиль (рис. 1), состоящий из двух высотных уровней: I – на верхней границе распространения отдельных деревьев в тундре и одиночных кустов *J. sibirica* (5–20 %), II – на верхней границе распространения редин и разреженных зарослей *J. sibirica* (21–40 %). Данный подход обусловлен тем, что сдвиг верхней границы редколесий, как было описано выше, оценивался с помощью дистанционных методов и *J. sibirica* на Южном Урале распространен только выше границы редколесий в пределах полосы его наибольшего распространения. На верхнем высотном уровне было заложено четыре пробных площади размером 20x20 м, на нижнем – три. На каждой из них фиксировалось точное местоположение всех особей *J. sibirica* и деревьев (*B. pubescens* ssp. *tortuosa*, *P. sylvestris*, *P. obovata*), определялись такие показатели, как диаметр в основании дерева, диаметр кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях, высота и возраст. У деревьев возраст определялся путем взятия кернов древесины вблизи уровня почвы и до высоты 20 см от ее уровня с помощью бурава Пресслера (Haglof, Langsele, Sweden). Возраст небольших деревьев (менее 3 см в диаметре) определяли путем взятия спила у основания ствола у каждой третьей особи с помощью ручной пилы. Если при взятии кернов мы

не попадали в центр ствола дерева, то отсутствующие кольца вычислялись с помощью прозрачной пленки с линиями концентрических окружностей разного размера, которые были сопоставимы с внутренними кольцами сердцевины. Используя высоту и возраст деревьев, рассчитали уравнение регрессии, с помощью которого определили поправки для определения возраста деревьев диаметром более 3 см. У *J. sibirica* возраст определялся по ранее разработанной нами специализированной методике (Grigoriev et al., 2020). У каждой особи *J. sibirica* с помощью ножовки брали поперечные спилы древесины в месте прикрепления самой толстой ветви к стволу. Поправка к возрасту куста на высоту прикрепления ветви определялась путем изучения хода роста у молодых особей *J. sibirica* от гипокотилия стволика до места его разделения на плагиотропные ветви. Полученные спилы и керны шлифовали на полировальной машине. Для лучшей визуализации годичных колец спилы и керны забеливали зубным порошком. Ширина годичных колец измерялась на полуавтоматической установке Lintab (RinnTech, Heidelberg, Germany) с точностью 0,01 мм. Измерения у *J. sibirica* проводили вдоль предварительно нанесенной извилистой линии, совпадающей с направлением максимального прироста (Горланова, 2009). Для абсолютной датировки времени появления или гибели деревьев и кустарников, точного определения их возраста мы использовали методы древесно-кольцевого анализа (Шиятов и др., 2000). В целом, на общей площади 0,28 га были определены морфологические показатели 174 кустов *J. sibirica* и 340 деревьев и практически для каждой особи установлен возраст.

На каждой пробной площади на глубину 10 см в почву были заложены термолотеры

Таблица 1. Характеристика локальных условий местопроизрастания на высотном профиле

Table 1. Characteristics of the local conditions of the altitudinal transect

Высотный уровень	Абсолютная высота, м	Положение в рельефе	Крутизна, град.	Степень увлажнения почвы	Средняя высота снежного покрова, см	Минимальная температура почвы, °С
I	1305–1311	перевал	0–5	временно сухие	29 ± 7,1	-5,4
II	1290–1300	Ю-В	5–10	временно сухие	41 ± 3,0	-4,7

и в зимнее время года произведено измерение высоты снежного покрова. Характеристика локальных условий местопроизрастания на профиле представлена в табл. 1. Верхняя часть профиля расположена на вершине г. Залавок на сильно ветрообдуваемом участке, где практически не происходит аккумуляции снежных масс в зимнее время года.

Климатические данные и корреляционный анализ

Оценка климата в районе исследований производилась по данным инструментальных измерений метеостанции «Златоуст». Были проанализированы ряды наблюдений с 1818 по 2015 г. по приземной температуре воздуха и с 1937 по 2015 г. по количеству осадков. Данные по осадкам были скорректированы поправками на смачивание и смену приборов (Bogdanova et al., 2002; Bogdanova, Gavrilova, 2008). Метеостанция находится в 90 км от изучаемых объектов и имеет наиболее длительный ряд наблюдений для всего региона. Для анализа данных средней месячной температуры воздуха и суммарных месячных осадков за весь период метеонаблюдений были выбраны периоды теплого (с июня по август) и холодного (с ноября по март) времени года. Аномалии средней температуры воздуха и суммарного количества осадков в холодном и теплом периодах каждого года определяли через разность между текущим значени-

ем и средним значением в базовом периоде (1961–1990 гг.).

Были проанализированы связи между количеством появившихся особей *J. sibirica* за пятилетние периоды и средними значениями климатических параметров за соответствующие и предыдущие пятилетия в различные периоды года (отдельные месяцы, холодный и теплый периоды). Оценка тесноты связи проводилась с помощью коэффициента корреляции Спирмена (R_s). Группировка данных по пятилетиям обусловлена тем, что период формирования шишкоягод у *J. sibirica* составляет 2–3 года (Сурсо, Барзут, 2010) и из-за задержки прорастания семян всходы появляются еще через 2–3 года (Зырянова и др., 2016).

Результаты и обсуждение

Оценка смещения верхней границы редколесий

Анализ изменения древесной растительности с использованием топографической карты и спутникового изображения горного массива Ирмель позволил выявить и оценить продвижение верхней границы редколесий (ВГР) за период с 1958 по 2020 гг. (рис. 2). Вертикальный сдвиг сплошной границы редколесий по медиане составил 34 м (5,5 м/10 лет). Высотное положение верхней границы редколесий изменялось в пределах от 1 до 53 м. Медиана горизонтального про-

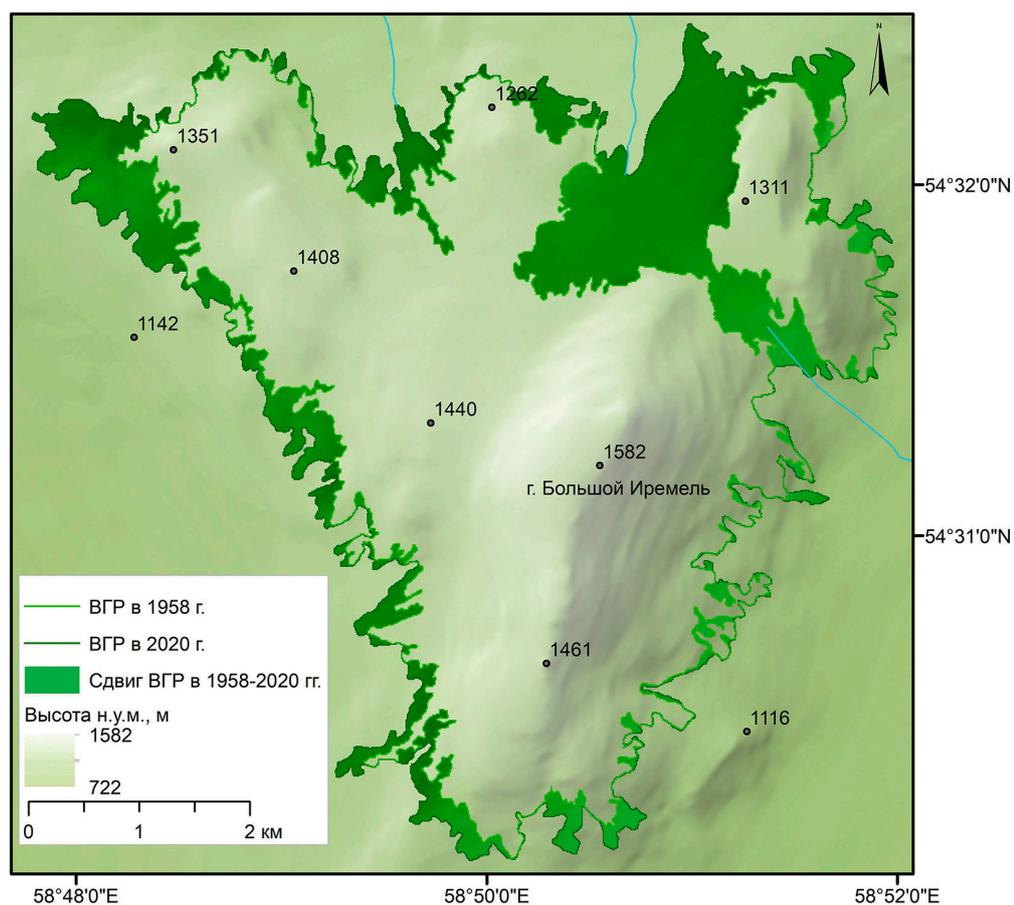


Рис. 2. Пространственно-временное изменение высотного положения верхней границы редколесий (ВГР) на массиве Иремель, Южный Урал, за период 1958–2020 гг.

Fig. 2. Spatial-temporal dynamics in the elevation of the upper limits of open forests in Iremel Massif, the Southern Urals, for the period of 1958–2020

движения сплошной границы редколесий составила 134 м (21,6 м/10 лет), при этом наибольшая и наименьшая величины смещения равнялись 1370 и 0 м соответственно. Общая площадь продвижения границы редколесий составила 6,97 км² (табл. 2).

Для оценки связи экспансии редколесий с элементами рельефа были проанализированы распределения площадей сдвига верхней границы редколесий в зависимости от экспозиции, высотного уровня, а также крутизны склона. Наблюдаемые тенденции пространственной динамики редколесий на исследуемой территории за период 1958–2020 гг.

(рис. 3а) свидетельствуют о существенной экспансии редколесий в тундру преимущественно на склонах северной и юго-западной экспозиции (29 и 17 % нормализованной площади S_n соответственно). Сравнительный анализ продвижения границы редколесий только на склонах северной (С, СЗ и СВ) и южной (Ю, ЮЗ и ЮВ) экспозиции (рис. 3б) показывает, что трансформация растительных сообществ в редколесье в основном происходила на высоте 1200–1300 м над ур.м. (75 и 85 % нормализованной площади S_n соответственно). Однако на северном склоне ВГР занимает более высокие рубежи, и около 21 % площади

Таблица 2. Характеристика изменений верхней границы редколесий на массиве Иремель, Южный Урал за 1958–2020 гг.

Table 2. Characteristics of changes in the upper border of open forests in Iremel Massif, Southern Urals, from 1958 to 2020

Параметр		Значение
Вертикальный сдвиг сплошной границы редколесий над ур.м.	Медиана, м	34 (с 1214 до 1248)
	Скорость, м/10 лет	5,5
Изменение высотного положения сплошной границы редколесий над ур.м.	Минимальное значение, м	1 (с 1042 до 1043)
	Максимальное значение, м	53 (с 1297 до 1350)
Положительный горизонтальный сдвиг сплошной границы	Медиана, м	134
	Скорость, м/10 лет	21,6
	Минимальное значение, м	0
	Максимальное значение, м	1370
Общая площадь продвижения границы редколесий, км ²		6,97

продвижения ВГР находится здесь на высоте более 1300 м над ур.м. Продвижение ВГР преимущественно происходило на склонах крутизной до 25° (рис. 3в). Для склонов, ориентированных на север, наиболее существенное продвижение ВГР произошло на пологих склонах крутизной до 5° (67 % нормализованной площади S_n). На южных склонах продвижение редколесий происходило на участках крутизной от 5 до 15° (85 % нормализованной площади S_n соответственно).

Д.С. Капралов с соавт. (2007) на основе повторного обследования в 2006 г. выделов, впервые описанных С.Г. Шиятовым в 1973 г., провел оценку изменений в составе, структуре и высотном положении редколесий на массиве Иремель за прошедшие 33 года. Сравнительный анализ данных 1973 и 2006 гг. показал, что горизонтальный сдвиг смещения еловых редколесий составил 83 м по всему массиву, при этом наибольшие смещения произошли на склонах северных экспозиций. Оценка среднего вертикального сдвига верхней границы леса показала, что

за рассматриваемый временной интервал она поднялась на 14 м (с 1314 до 1328 м над ур.м.). Сравнительный анализ полученных нами данных и данных Д.С. Капралова с соавт. (2007) свидетельствует, что смещение верхней границы древесной растительности вдоль высотного градиента на массиве Иремель продолжается и в настоящее время. На многих отдельных вершинах и перевалах массива при современных тенденциях изменения лесопокрываемых площадей возможно полное исчезновение горных тундр в ближайшие десятки лет.

Анализ разновременных фотоснимков

Место съемки расположено на г. Седло (рис. 1), направление съемки на юго-запад. На переднем плане непосредственно у точки съемки виден южный склон г. Седло, на дальнем плане – северный склон западного отрога г. Иремель. Сопоставление пары разновременных фотоснимков свидетельствует, что за рассматриваемый временной интервал (40 лет) произошло заметное продвиже-

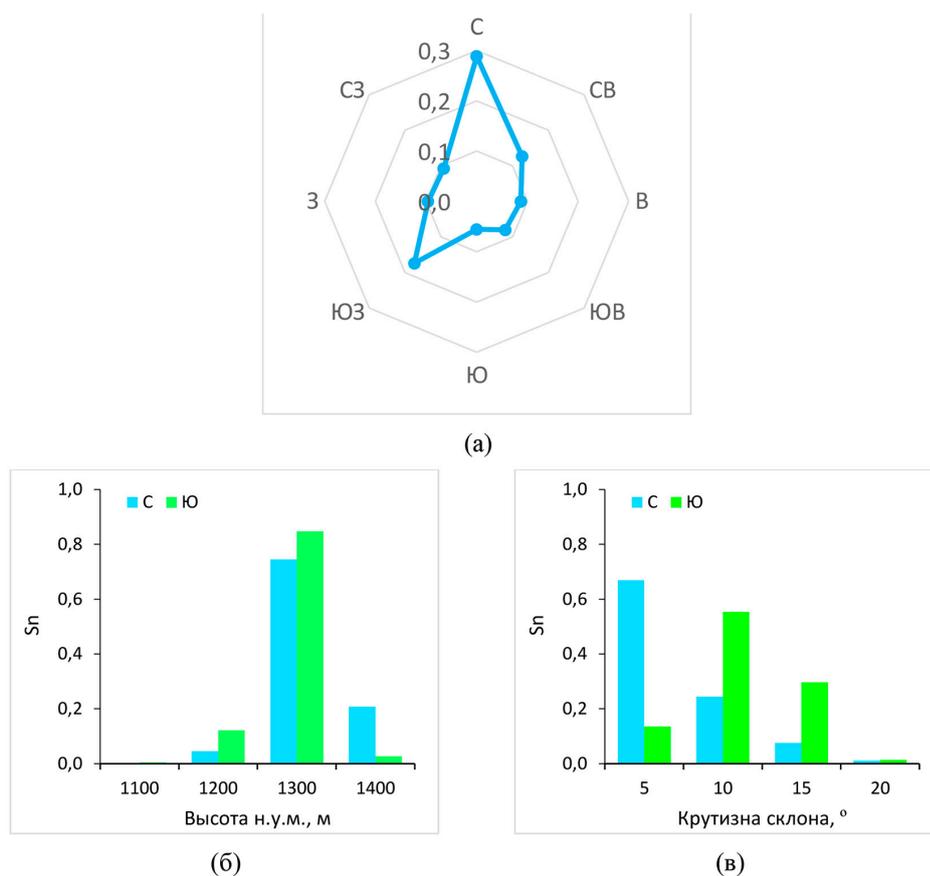


Рис. 3. Распределение нормализованных площадей продвижения верхней границы редколесий (S_n) по градациям экспозиции (а), абсолютной высоты и крутизны для склонов в совокупности северной, северо-западной, северо-восточной (С) и южной, юго-западной, юго-восточной (Ю) экспозиции (б, в) для массива Ирмель, Южный Урал за период 1958–2020 гг.

Fig. 3. Distribution of normalized areas of advancement of the upper limits of open forests (S_n) according to exposure gradations (a), elevation above sea level and steepness of slopes in the aggregate of the northern, northwestern, northeastern (N) and southern, southwestern, southeastern (S) exposures (b, c) in Iremel Massif, the Southern Urals, for the period of 1958–2020

ние древесной растительности выше в горы, а также увеличение продуктивности, густоты и сомкнутости произрастающих в 1976 г. еловых древостоев.

Анализ повторных фотоснимков с помощью программы WSL Monoplotting Tool показал существенное смещение границ различных типов фитоценозов, а также увеличение густоты и сомкнутости крон на отдельных участках (рис. 4). Количественная оценка изменения площади участков, занятых древостоями различной сомкнутости, показала

(рис. 5), что за последние 40 лет площадь сомкнутых лесов увеличилась почти в 2 раза, редколесий – в 5 раз, редины – в 2 раза, площадь участков с одиночными деревьями сократилась в 4 раза.

*Возрастная и морфологическая структура *J. sibirica* и деревьев*

Результаты соответствующих расчетов свидетельствуют, что на заложенном высотном профиле по мере продвижения в гору (по мере ухудшения условий для роста) за-

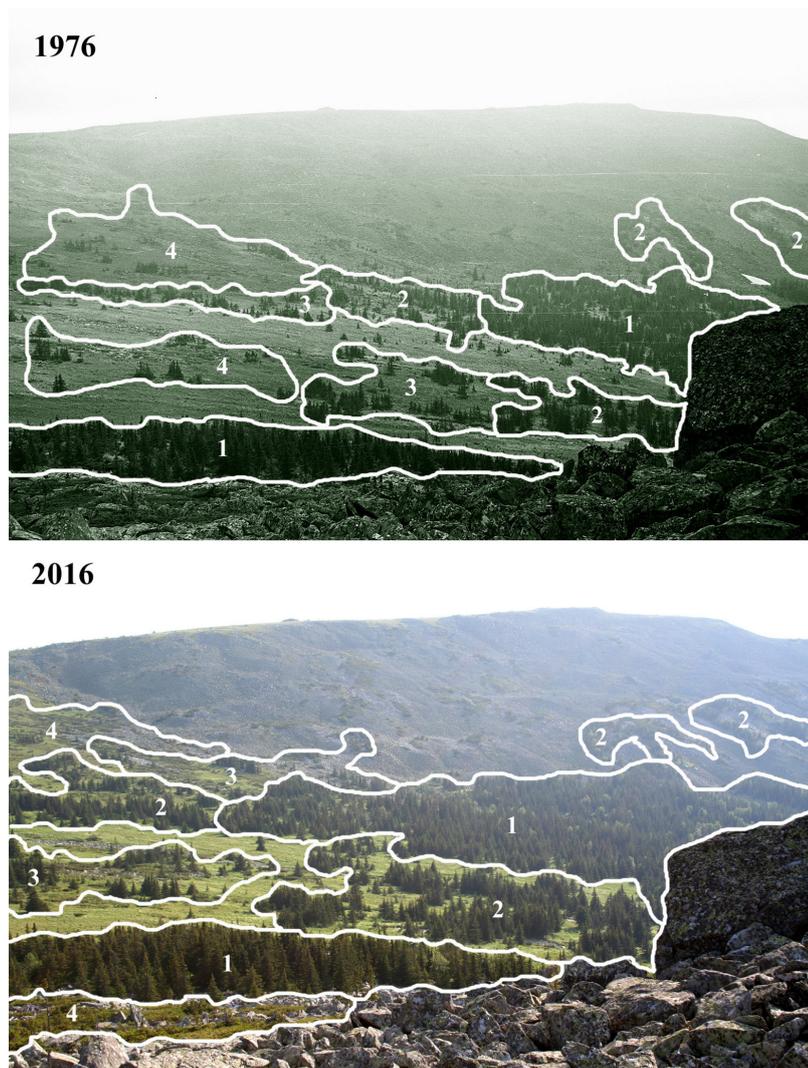


Рис. 4. Повторные фотоснимки массива Ирмель, Южный Урал 1976 и 2016 гг. (1 – сомкнутый лес, 2 – редколесье, 3 – редина, 4 – отдельные деревья)

Fig. 4. Repeat photography of Iremel Massif, the Southern Urals, in 1976 and 2016 (1 – closed forest, 2 – open forest, 3 – sparse forest, 4 – single trees)

кономерно изменяются (уменьшаются) средние морфологические и площадные характеристики (табл. 3) у *J. sibirica*. Так, у особей *J. sibirica* средняя высота уменьшается в 1,2 раза, диаметр кроны – в 2 раза, возраст – в 1,5 раза. У древесных видов средние показатели изменяются на незначительную величину или практически не меняются. Густота зарослей *J. sibirica* на обоих высотных уровнях одинакова, проекция крон уменьшается

в 3 раза по мере увеличения абсолютной высоты.

Заселение нижнего высотного уровня *J. sibirica* началось еще в начале XX в. (рис. 6). Наибольший всплеск численности произошел с 1920 по 1930-е гг. На верхнем высотном уровне первые особи *J. sibirica* появились только в 1930-х гг. Наиболее активно этот процесс происходил здесь в период с 1950 по 1980-е гг.

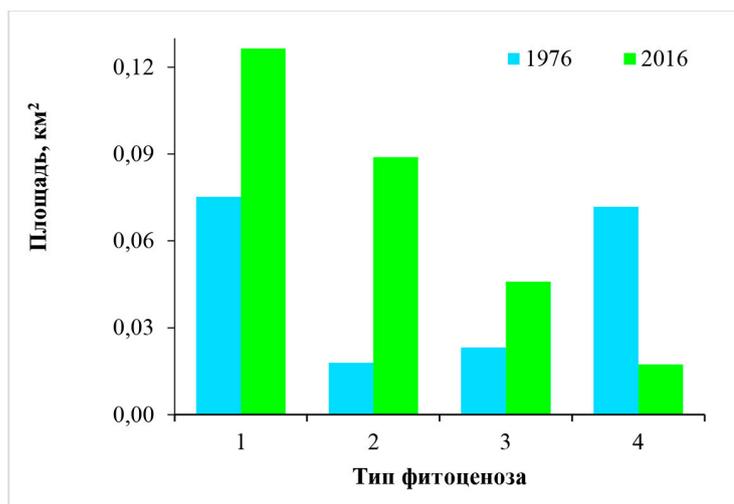


Рис. 5. Площади участков с различными типами фитоценозов (1 – сомкнутый лес, 2 – редколесье, 3 – редина, 4 – отдельные деревья), выделенные на повторных фотоснимках массива Ирмель, Южный Урал 1976 и 2016 гг.

Fig. 5. Areas of plots with different types of plant communities (1 – closed forest, 2 – open forest, 3 – sparse forest, 4 – single trees), identified on repeat photographs of Iremel Massif, the Southern Urals, in 1976 and 2016

Таблица 3. Средние морфологические и площадные показатели деревьев и особей *J. sibirica* на различных высотных уровнях профиля

Table 3. Average morphological features and areal characteristics of trees and *J. sibirica* at different altitude levels of the altitudinal transect

Высотный уровень	Средние показатели			Площадные характеристики	
	Высота, м	Возраст, лет	Диаметр кроны, м	Густота, шт./га	Сумма проекций крон, м²/га
<i>Juniperus sibirica</i>					
Верхний	0,22 ± 0,02	51 ± 2	1,24 ± 0,07	625	941
Нижний	0,27 ± 0,01	75 ± 3	2,07 ± 0,12	619	2787
Древесные виды (<i>Betula pubescens</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Picea abies</i>)					
Верхний	0,77 ± 0,06	21 ± 1	0,74 ± 0,06	950	933
Нижний	0,93 ± 0,05	22 ± 1	0,76 ± 0,05	1412	1162

Первая древесная растительность (из ныне существующих деревьев) здесь появилась только в 40-х гг. XX в. на верхнем высотном уровне и в 1950-х гг. на нижнем. Наиболее массовый всплеск численности деревьев на обоих высотных уровнях произошел только после 1990-х гг. и продолжается по настоящее время. В целом древесная растительность на исследуемом участке склона

стала заселяться позднее доминирующего здесь кустарникового вида *J. sibirica*.

Оценка локальных условий местопроизрастания на профиле, выполненная по данным термолоттеров и снегомерных работ, показала, что высота снежного покрова увеличивается со снижением абсолютной высоты. Почвы на глубине 10 см наиболее сильно промерзают на верхнем высотном уровне – до минус 5,4 °С.

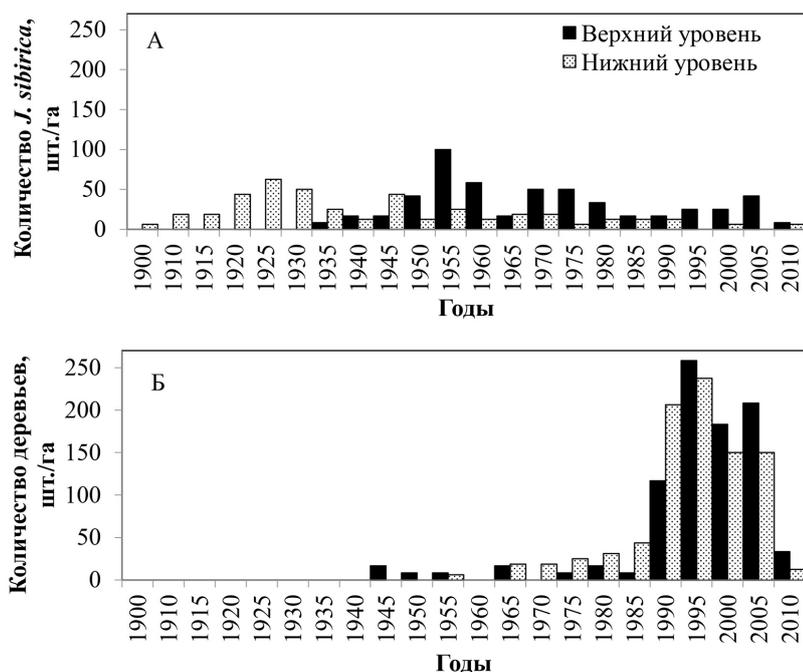


Рис. 6. Распределение количества особей *J. sibirica* и деревьев по периодам их появления на высотном профиле

Fig. 6. Distribution of the number of *J. sibirica* shrubs and trees by the periods of their establishment on the elevational transect

Изменение климатических параметров

По данным метеорологических наблюдений на ближайшей к району исследований метеостанции «Златоуст» (находящейся у подножия гор Южного Урала), климат стал более теплым и влажным, при этом наиболее заметные изменения произошли в холодный период года (ноябрь-март). Оценка динамики аномалий средней температуры воздуха в холодном периоде свидетельствует о возрастании показателя по линейному тренду на $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 100 лет, для суммарных осадков увеличение составляет $48,8\text{ мм}$ за 100 лет (Григорьев и др., 2018).

Для оценки связи между изменениями климатических параметров и появлением *J. sibirica* на пробных площадках г. Залавок массива Ирмель был проведен корреляционный анализ по данным за период 1900–

2005 гг. Установлены высокие значения коэффициентов корреляции между количеством особей *J. sibirica*, появившихся за пятилетний период в совокупности на всех пробных площадках, и осадками начала холодного периода года (ноябрь-январь) в пятилетии, предшествующем появлению *J. sibirica* ($R_s = 0,61$, $p = 0,01$) (табл. 4).

В ряде работ было показано, что именно зимние условия благоприятно влияют на рост и экспансию кустарников в высокогорьях (Wipf et al., 2009; Hallinger et al., 2010; Frost et al., 2018; Carrer et al., 2019). Эти выводы подтверждаются выявленными нами высокими корреляционными связями между пополнением *J. sibirica* и осадками текущего и предшествующего периодов. Объяснением полученных данных может быть важность снежного покрова для роста и выживания в целом древесно-кустарниковой

Таблица 4. Коэффициент корреляции Спирмена между числом появившихся особей *J. sibirica* и климатическими параметрами для соответствующих и предшествующих пятилетий

Table 4. Spearman's correlation coefficients calculated by relating the number of recruited *J. sibirica* and climate variables corresponding to current and previous five-year periods

Высотный уровень	Осадки				Температура			
	соотв.		пред.		соотв.		пред.	
	хол.	тепл.	хол.	тепл.	хол.	тепл.	хол.	тепл.
Верхний	0,19	-0,23	0,43	-0,41	-0,09	-0,08	0,33	-0,03
Нижний	0,11	-0,07	0,46	0,16	-0,42	-0,03	-0,45	-0,08
Все	0,14	-0,16	0,61	-0,23	0,05	0,15	0,10	0,15

Примечания. Климатические параметры приведены для начала холодного (ноябрь-январь) и теплого (июнь-август) периодов. Статистическая значимость на уровне $p < 0,05$ выделена жирным шрифтом.

растительности в высокогорьях (Holtmeier, 2003). Известно, что снежный покров – один из важнейших факторов, контролирующих микроклимат и условия выживания растений для арктических и альпийских экосистем (Wipf, Rixen, 2010). Снежный покров защищает растения от экстремальных зимних ветров и температур, изменяет зимнюю температуру почвы и повышает весенний сток (Wahren et al., 2005). В альпийских экосистемах, где снег перераспределяется ветром, саженцы могут подвергаться воздействию атмосферных температур, а не быть защищены изолирующим снежным покровом и, следовательно, может быть увеличение зимней смертности на открытых гребнях (Wipf et al., 2009). Уменьшение снежного покрова может оказывать слабое и немедленное прямое воздействие на подстилку, скорость разложения и наличие азота (N) в альпийских тундрах (Sturm et al., 2005; Baptist et al., 2010). Чем выше высота снега, тем меньше температура промерзания почвы и тем меньше повреждается корневая система (Sveinbjörnsson et al., 1996; Groffman et al., 2001). Было показано, что снежный покров может влиять на радиальный рост листовых кустарников (*Salix arctica*) в Гренландии (Schmidt et al., 2010) и хвойных кустарников (*Juniperus*) в Альпах (Carrer et al.,

2019). Даже кратковременное снижение высоты снежного покрова в результате потепления в зимнее время года также может приводить к повреждению кустарниковой растительности (Vokhorst et al., 2009).

Заключение

В настоящее время высокогорья Южного Урала являются одними из наиболее динамично зарастающих в Уральских горах. На многих горных вершинах вследствие смещения растительных рубежей произошло значительное сокращение площадей, занятых горно-тундровыми сообществами, на отдельных вершинах горные тундры исчезли полностью. За последние 60 лет на массиве Ирмель общая площадь продвижения границы редколесий составила 6,97 км². Отдельные перевалы и небольшие возвышенности массива к настоящему времени полностью покрылись лесом. В данной работе впервые был получен положительный опыт использования программы WSL Monoplotting Tool с целью количественной оценки изменения в растительном покрове на основе анализа одновременных фотоснимков, сделанных с одних и тех же точек в горах Южного Урала. Показано, что помимо смещения верхней границы редколесий происходит активная

экспансия *J. sibirica* и отдельных деревьев в сообщества горных тундр в самые экстремальные условия для произрастания – перевалы гор. *J. sibirica* как более пластичный вид выступает пионерным видом в данном процессе. Расширению *J. sibirica* способствовало увеличение осадков в зимнее время года. При современных тенденциях и скоростях увеличения площадей, занятых лесной растительностью, на массиве Ирмель возможны значительные сокращения горно-тундровых экосистем в будущем.

Список литературы / References

Борисевич Д. В. (1968) Рельеф и геологическое строение. *Урал и Приуралье. Серия: Природные условия и естественные ресурсы СССР*. М., Наука, с. 19–81 [Borisevich D. V. (1968) Relief and geological structure. *Ural and Cis-Urals. Series: Natural conditions and natural resources of the USSR*. Moscow, Nauka, p. 19–81 (in Russian)]

Горланова Л. А. (2009) *Дендроклиматический анализ можжевельника сибирского (Juniperus sibirica Bergsd.) на Полярном Урале*. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук, 22 с. [Gorlanova L. A. (2009) *Dendroclimatic analysis of Siberian juniper (Juniperus sibirica Bergsd.) in the Polar Urals*. Abstract of the thesis of a candidate of biological sciences, 22 p. (in Russian)]

Горчаковский П. Л. (1966) *Флора и растительность высокогорий Урала*. Свердловск, УрФ АН СССР, 270 с. [Gorchakovskij P. L. (1966) *Flora and vegetation of the highlands of the Urals*. Sverdlovsk, UrF AN SSSR, 284 p. (in Russian)]

Горчаковский П. Л. (1975) *Растительный мир высокогорий Урала*. М., Наука, 284 с. [Gorchakovskij P. L. (1975) *Vegetative world of Ural high elevation*. Moscow, Nauka, 284 p. (in Russian)]

Горчаковский П. Л., Шиятов С. Г. (1985) *Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях*. М., Наука, 208 с. [Gorchakovskiy P. L., Shiyatov S. G. (1985) *Phytoindication of environmental conditions and natural processes in high elevation*. Moscow, Nauka, 208 p. (in Russian)]

Григорьев А. А., Ерохина О. В., Соковнина С. Ю., Шалаумова Ю. В., Балакин Д. С. (2018) Продвижение древесно-кустарниковой растительности в горы и изменение состава тундровых сообществ (хр. Зигальга, Южный Урал). *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, 11(3): 218–236 [Grigor'ev A. A., Erokhina O. V., Sokovnina S. U., Shalaumova Yu. V., Balakin D. S. (2018) The advance of woody and shrub vegetation to the mountains and changes in the composition of tundra communities (Poperechnaya mountain, the Zigalga mountain range in the Southern Urals). *Journal of Siberian Federal University. Biology* [Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologija], 11(3): 218–236 (in Russian)]

Зырянова Ю. В., Аёшина Е. Н., Величко Н. А., Кузьмичева М. Н. (2016) Преодоление глубокого физиологического покоя зародышей можжевельника сибирского in vitro. *Хвойные бореальной зоны*, 34(1–2): 38–43 [Zyryanova Yu. V., Ayoshina E. N., Velichko N. A., Kuzmicheva M. N. (2016) Overcoming the deep physiological dormancy of the embryos of the Siberian juniper in vitro. *Conifers of the Boreal Zone* [Hvoynnye borealnoy zony], 34(1–2): 38–43 (in Russian)]

Игошина К. Н. (1964) Растительность Урала. *Труды Ботанического института им. В. Л. Комарова АН СССР*, 3(16): 83–230 [Igoshina K. N. (1964) Vegetation of Ural. *Proceedings of V. L. Komarov Botanical Institute, Academy of Sciences USSR* [Trudy Botanicheskogo instituta im. V. L. Komarova AN SSSR], 3(16): 83–230 (in Russian)]

Капралов Д. С., Шиятов С. Г., Фомин В. В., Шалаумова Ю. В. (2007) Пространственно-временная динамика верхней границы леса на Южном Урале. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 180: 59–68 [Kaprалov D. S., Shiyatov S. G., Fomin V. V., Shalaumova Yu. V. (2007) Spatial-temporal dynamics of the upper forest boundary in the Southern Urals. *Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy* [Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii], 180: 59–68 (in Russian)]

Кувшинова К. В. (1968) Климат. *Урал и Приуралье*. М., Наука, с. 82–118 [Kuvshinova K. V. (1968) Climate. *Urals and Cis-Urals*. Moscow, Nauka, p. 82–118 (in Russian)]

Сурсо М. В., Барзут О. С. (2010) Особенности роста и развития хвойных в Большеземельской тундре. Можжевельник в урочище Пым-Ва-Шор. *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник*, 6: 18–21 [Surso M. V., Barzut O. S. (2010) Features of the growth and development of conifers in the Bolshezemelskaya tundra. Juniper in the Pym-Va-Shor tract. *Bulletin of the Moscow State University of Forest – Forestry Bulletin* [Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik], 6: 18–21 (in Russian)]

Тюлина Л. Н. (1931) Материалы по высокогорной растительности Южного Урала. *Известия Всесоюзного географического общества*, 63(5/6): 453–499 [Tyulina L. N. (1931) Materials on alpine vegetation of the Southern Urals. *Proceedings of the All-Union Geographical Society* [Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva], 63(5/6): 453–499 (in Russian)]

Шиятов С. Г. (1982) Анализ смен лесной растительности на массиве Ирмель (Южный Урал) при помощи использования старых фотоснимков. *Изучение и освоение флоры и растительности высокогорий: тез. докл.* Свердловск, с. 102 [Shiyatov S. G. (1982) Analysis of changes in forest vegetation on Iremel Massif (South Ural) using old photographs. *Study and development of flora and vegetation of high mountains: Abstracts*. Sverdlovsk, p. 102 (in Russian)]

Шиятов С. Г. (1983) Опыт использования старых фотоснимков для изучения смен лесной растительности на верхнем пределе ее произрастания. *Флористические и геоботанические исследования на Урале*. Свердловск, УНЦ АН СССР, с. 76–109 [Shiyatov S. G. (1983) Experience of using old photographs to study changes in forest vegetation at the upper limit of its growth. *Floristic and geobotanical research in the Urals*. Sverdlovsk, UNC AN SSSR, p. 76–109 (in Russian)]

Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурзбаев М. М., Хантемиров Р. М. (2000) *Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации*. Красноярск, КрасГУ, 80 с. [Shiyatov S. G., Vaganov E. A., Kirduyanov A. V., Kruglov V. B., Mazepa V. S., Naurzbaev M. M., Khantemirov R. M. (2000) *Methods of dendrochronology. Part I. Fundamentals of dendrochronology. Collection and receipt of tree-ring information*. Krasnoyarsk, KrasGU, 80 p. (in Russian)]

Шиятов С. Г., Мойсеев П. А., Григорьев А. А. (2020) *Фотомониторинг древесной и кустарниковой растительности в высокогорьях Южного Урала за последние 100 лет*. Екатеринбург, Издательство УМЦ УПИ, 191 с. [Shiyatov S. G., Moiseev P. A., Grigoriev A. A. (2020) *Photomonitoring of tree and shrub vegetation in the highlands of the Southern Urals over the past 100 years*. Yekaterinburg, Publishing House UMC UPI, 191 p. (in Russian)]

Baptist F., Yoccoz N. G., Choler P. (2010) Direct and indirect control by snow cover over decomposition in alpine tundra along a snowmelt gradient. *Plant and Soil*, 328(1): 397–410

Bogdanova E. G., Golubev V. S., Il'in B.M., Dragomilova I. V. (2002) New model for correction of measured precipitation and its use in Russian polar regions. *Russian Meteorology and Hydrology*, 10: 47–67

Bogdanova E.G., Gavrilova S. Yu. (2008) Correction of the precipitation time series nonhomogeneity caused by replacement of the Nipher shielded rain gauge by a Tretyakov precipitation gauge. *Russian Meteorology and Hydrology*, 33(8): 525–536

Bokhorst S. F., Bjerke J. W., Tømmervik H., Callaghan T. V., Phoenix G. K. (2009) Winter warming events damage sub-Arctic vegetation: consistent evidence from an experimental manipulation and a natural event. *Journal of Ecology*, 97(6): 1408–1415

Bozzini C., Conedera M., Krebs P. (2012) A new monoploting tool to extract georeferenced vector data and orthorectified raster data from oblique non-metric photographs. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(3): 499–518

Carrer M., Pellizzari E., Prendin A. L., Pividori M., Brunetti M. (2019) Winter precipitation – not summer temperature – is still the main driver for Alpine shrub growth. *Science of the Total Environment*, 682: 171–179

Frost G. V., Epstein H. E., Walker D. A., Matyshak G., Ermokhina K. (2018) Seasonal and long-term changes to active-layer temperatures after tall shrubland expansion and succession in arctic tundra. *Ecosystems*, 21(3): 507–520

Grigoriev A. A., Shalaumova Y. V., Erokhina O. V., Sokovnina S. Y., Vatolina E. I., Wilmking M. (2020) Expansion of *Juniperus sibirica* Burgsd. as a response to climate change and associated effect on mountain tundra vegetation in the Northern Urals. *Journal of Mountain Science*, 17(10): 2339–2353

Grigoriev A. A., Shalaumova Yu.V., Balakin D. S. (2021) Current expansion of *Juniperus sibirica* Burgsd. to the mountain tundras of the Northern Urals. *Russian Journal of Ecology*, 52(5): 376–382

Groffman P.M., Driscoll C. T., Fahey T.J., Hardy J.P., Fitzhugh R. D., Tierney G.L. (2001) Colder soils in a warmer world: a snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. *Biogeochemistry*, 56(2): 135–150

Hagedorn F., Shiyatov S. G., Mazepa V. S., Devi N. M., Grigor'ev A. A., Bartysh A. A., Fomin V. V., Kapralov D. S., Terent'ev M.M., Bugman H., Rigling A., Moiseev P. A. (2014) Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions? *Global Change Biology*, 20(11): 3530–3543

Hallinger M., Manthey M., Wilmking M. (2010) Establishing a missing link: Warm summers and winter snow cover promote shrub expansion into alpine tundra in Scandinavia. *New Phytologist*, 186(4): 890–899

Hansson A., Dargusch P., Shulmeister J. (2021) A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage. *Journal of Mountain Science*, 18(2): 291–306

Holtmeier F.K. (2003) *Mountain timberlines. Ecology. Patchiness, and dynamics*. Dordrecht, Kluwer, 369 p.

IPCC, 2021: *Summary for Policymakers (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B.R., Maycock T. K.,

Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 3–32

Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A. (2018) Warming hiatus and evergreen conifers in Altay-Sayan Region, Siberia. *Journal of Mountain Science*, 15(12): 2579–2589

Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Vdovin A. S. (2010) Spatial distribution and temporal dynamics of high-elevation forest stands in southern Siberia. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6): 822–830

Lu X., Liang E., Wang Y., Babst F., Camarero J. J. (2021) Mountain treelines climb slowly despite rapid climate warming. *Global Ecology and Biogeography*, 30(1): 305–315

McCaffrey D. R., Hopkinson C. (2017) Assessing fractional cover in the alpine treeline ecotone using the WSL Monoplotting Tool and airborne lidar. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43(5): 504–512

Moiseev P. A., van der Meer M., Rigling A., Shevchenko I. G. (2004) Effect of climatic changes on the formation of siberian spruce generations in subglotsy tree stands of the Southern Urals. *Russian Journal of Ecology*, 35(3): 135–143

Pauli H., Gottfried M., Dullinger S., Abdaladze O., Akhalkatsi M., Alonso J. L. B., Coldea G., Dick J., Erschbamer B., Calzado R. F., Ghosn D., Holten J. I., Kanka R., Kazakis G., Kollár J., Larsson P., Moiseev P., Moiseev D., Molau U., Mesa J. M., Nagy L., Pelino G., Puşcaş M., Rossi G., Stanisci A., Syverhuset A. O., Theurillat J.-P., Tomaselli M., Unterluggauer P., Villar L., Vittoz P., Grabherr G. (2012) Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, 336(6079): 353–355

Schmidt N. M., Baittinger C., Kollmann J., Forchhammer M. C. (2010) Consistent dendrochronological response of the dioecious *Salix arctica* to variation in local snow precipitation across gender and vegetation types. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42(4): 471–475

Sturm M., Schimel J., Michaelson G., Welker J. M., Oberbauer S. F., Liston G. E., Fahnestock J., Romanovsky V. E. (2005) Winter biological processes could help convert arctic tundra to shrubland. *BioScience*, 55(1): 17–26

Sveinbjörnsson B., Kauhanen H., Nordell O. (1996) Treeline ecology of mountain birch in the Tornetrask area. *Ecological Bulletins*, 45: 65–70

Wahren C.-H. A., Walker M. D., Bret-Harte M. S. (2005) Vegetation responses in Alaskan arctic tundra after 8 years of a summer warming and winter snow manipulation experiment. *Global Change Biology*, 11(4): 537–552

Wipf S., Rixen C. (2010) A review of snow manipulation experiments in Arctic and alpine tundra ecosystems. *Polar Research*, 29(1): 95–109

Wipf S., Stoeckli V., Bebi P. (2009) Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing. *Climatic Change*, 94(1–2): 105–121

Zhou W., Mazepa V., Shiyatov S., Shalaumova Y. V., Zhang T., Liu D., Sheshukov A., Wang J., El Sharif H., Ivanov V. (2022) Spatiotemporal dynamics of encroaching tall vegetation in timberline ecotone of the Polar Urals Region, Russia. *Environmental Research Letters*, 17(1): 014017

DOI 10.17516/1997-1389-0381

УДК 551.513: 581.824.1

Influence of Atmospheric Circulation on the Formation of Light Rings in Larches in the Subarctic Siberia

Marina A. Gurskaya*

*Institute of Plant and Animal Ecology UB RAS
Ekaterinburg, Russian Federation*

Received 03.03.2022, received in revised form 20.05.2022, accepted 20.06.2022

Abstract. Atmospheric circulation determines both weather and climatic conditions of a region. Phase changes in extratropical circulation lead to long-term climatic changes in high latitudes due to the alterations in atmospheric pressure and redistribution of precipitations. In high latitudes biota is especially sensitive to climatic fluctuations. One of the climatic characteristics of high latitudes is the recurrence of extreme climatic events such as short/cold growing season, which can be registered in annual tree rings as light rings (rings with underdeveloped late wood zone). We compared the frequency of formation of light rings in Subarctic Siberia, their intensity and spatial distribution with the main types of atmospheric circulation characteristic of high latitudes: North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation and Pacific Decadal Oscillation. Chronologies of light rings were built based on the data from 19 sites located in the northern forest tundra from the Polar Urals to the Kolyma River which make a 4000-km-long profile. We focused on the periods when light rings are formed frequently during a decade (more than four years with light rings per decade) and, on the contrary, very rarely (less than three cases per decade). Positive correlations of light-ring chronologies with the North Atlantic Oscillation index in September of the preceding year were revealed in the Siberian and Gmelinii larches. Negative correlations were revealed with the July Arctic Oscillation index and June Pacific Oscillation index in the Gmelinii and Kajanderii larches. Massive formation of light rings resulting from registered volcanic eruptions does not coincide with the phases of atmospheric oscillations. In the long-term periods (several decades), light rings can be markers of positive or negative phases of different types of atmospheric circulation.

Keywords: North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, light rings, larch, Subarctic Siberia.

© 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: 0000-0001-5815-7228

Acknowledgements. This work was supported in part by RFBR (No. 20-05-00569a) and Russian Science Foundation (No. 21-14-00330) grants, with partial support from State Program No. FUWU-2022-0004.

Citation: Gurskaya M. A. Influence of atmospheric circulation on the formation of light rings in larches in the Subarctic Siberia. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(2), 167–182. DOI: 10.17516/1997-1389-0381

Влияние атмосферной циркуляции на формирование светлых колец в древесине лиственницы в Сибирской Субарктике

М. А. Гурская

*Институт экологии растений и животных УрО РАН
Российская Федерация, Екатеринбург*

Аннотация. Атмосферная циркуляция определяет как погодные, так и климатические условия региона. Изменение атмосферных потоков ведет к формированию аномалий погоды, а изменение фазы внетропических циркуляций – к долгосрочным климатическим изменениям и аномалиям в высоких широтах за счет изменения давления атмосферы и перераспределения осадков. В высоких широтах биота особенно чувствительна к климатическим колебаниям. Одна из климатических характеристик высоких широт – повторяемость экстремальных климатических явлений, таких как короткий/холодный вегетационный период, который может быть зарегистрирован в годичных кольцах деревьев в виде светлых колец (колец с не полностью сформированной зоной поздней древесины). В работе проведено сравнение частоты формирования светлых колец в Сибирской Субарктике, их интенсивности формирования и пространственного распределения с основными типами атмосферной циркуляции, характерными для высоких широт: Северо-Атлантическим колебанием, арктической осцилляцией и тихоокеанской декадной осцилляцией. Хронологии светлых колец построены на основе 19 точек, расположенных в северной лесотундре от Полярного Урала до р. Колыма, составляя профиль длиной 4000 км. Выделены периоды, когда светлые кольца формируются часто в течение десятилетия (более четырех лет в десятилетие) или, наоборот, очень редко (менее трех случаев в десятилетие). Выявлены значимые ($p\text{-level} \leq 0,05$) положительные корреляционные связи с Северо-Атлантическим колебанием в сентябре предшествующего года у лиственницы сибирской и Гмелина; отрицательные корреляции с арктической осцилляцией июля и с тихоокеанской осцилляцией июня у лиственницы Гмелина и Каяндера. Крупные извержения вулканов проявляются в виде массового формирования светлых колец в отдельно взятый год на большой территории и не влияют на частоту формирования светлых колец в результате воздействия разных фаз атмосферной осцилляции. В долгосрочной перспективе (несколько десятилетий) светлые кольца могут быть маркерами положительных или отрицательных фаз атмосферной циркуляции разных типов.

Ключевые слова: Северо-Атлантическое колебание, арктическая осцилляция, тихоокеанская декадная осцилляция, светлые кольца, лиственница, Сибирская Субарктика.

Благодарности: Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (№ 20-05-00569а) и РНФ (№ 21-14-00330), частичной поддержке государственной программы № FUWU-2022-0004.

Цитирование: Гурская, М. А. Влияние атмосферной циркуляции на формирование светлых колец в древесине лиственницы в Сибирской Субарктике // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 167–182. DOI: 10.17516/1997-1389-0381

Введение

Климат в определенном месте – это среднее состояние атмосферы за длительный период, например несколько месяцев или лет. Климат меняется намного медленнее, чем погода, которая может сильно меняться день ото дня. Естественную форму изменчивости климата, объясняющую короткие и длинные фазы климата, вызванные естественными крупномасштабными особенностями, описывают климатическими индексами. В частности, индексы аномалий атмосферного давления в разных местах в пределах рассматриваемой области рассчитывают, используя градиент атмосферного давления между точками, а не абсолютные значения станции.

В широтах выше 20° самыми распространенными индексами аномалий атмосферного давления являются Северо-Атлантическое колебание (САК), впервые описанное около ста лет назад Уолкером (Walker, 1923; Barnston, Livezey, 1987), арктическая осцилляция (АО), выделенная относительно недавно (Thompson, Wallace, 1998), тихоокеанская декадная осцилляция (ТДО), отмеченная также около ста лет назад (Walker, Bliss, 1932) и др. Как и любые осцилляции, названные индексы характеризуются положительной и отрицательной фазой (рис. 1).

Северо-Атлантическое колебание формируется в результате разницы давлений между Азорскими островами и Исландией и проявляется сильной циркуляцией ветров в море.

Влияние САК и его фаз ощущается во всем Атлантическом океане и на окружающих его континентах. В положительной фазе САК в Северной Европе (Скандинавии) наблюдается усиление штормов и осадков, а также температуры выше средних, что связано с воздушными массами, прибывающими из более низких широт. В то же время в Южной Европе наблюдается уменьшение штормов и осадков ниже среднего. В восточной части Северной Америки положительная фаза САК приводит к меньшему количеству снегопадов в коридоре Вашингтон, округ Колумбия / Нью-Йорк и более низким температурам на восточном побережье Канады и западе Гренландии. В отрицательной фазе САК атлантическое течение более ориентировано с запада на восток, и это приводит к уменьшению штормов, уровню осадков ниже среднего и температурам ниже средних в Северной Европе. Напротив, в Южной Европе наблюдается усиление штормов, количество осадков выше среднего и температура выше средней. В восточной части Северной Америки отрицательная фаза САК обычно приводит к более низкому атмосферному давлению, что вызывает зимние шторма и холод (рис. 1).

Арктическое колебание характеризуется различным давлением воздуха в высоких широтах Арктики по сравнению с более низкими северными широтами. Ключевой особенностью АО является его зонально-симметричный вид с основным центром действия над Арктикой

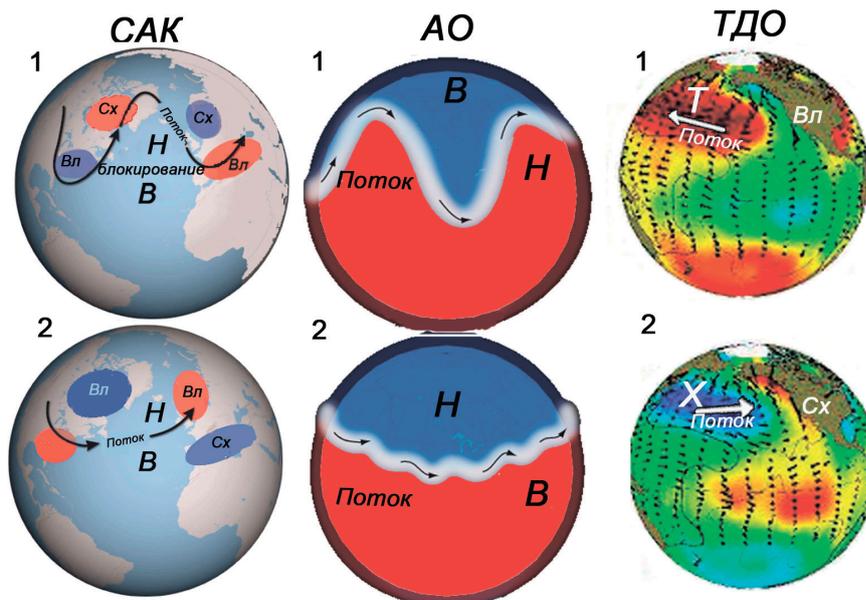


Рис. 1. Основные типы атмосферной осцилляции в высоких широтах северного полушария: 1 – отрицательная фаза, 2 – положительная фаза, Н – низкое давление, В – высокое давление, Сх – мало осадков, Вл – много осадков, Т – теплый воздух, Х – холодный воздух, стрелки указывают направление потоков воздуха, «поток» – воздушный поток, красным выделены теплые области, синим – холодные

Fig. 1. Main types of atmospheric oscillations at high latitudes of the northern hemisphere. САК – NAO, ТДО – PDO. 1 – negative phase, 2 – positive phase. Н – low pressure, В – high pressure, Сх – low precipitation, Вл – high precipitation, Т – warm air mass, Х – cold air mass; arrows show the direction of air flows; “поток” – air flow; warm areas – red, cold areas – blue

и противостоящими аномалиями в средних широтах. В положительной фазе низкое давление над высокой Арктикой притягивает более теплый и влажный воздух на север из более низких широт. В отрицательной фазе давление становится высоким на Крайнем Севере, благодаря чему Арктика остается холодной и сухой, а холодный воздух выталкивается на юг над Северной Америкой и Евразией (рис. 1).

Тихоокеанская декадная осцилляция сосредоточена в средних широтах Тихоокеанского бассейна. Этот климатический режим также влияет на температуру воздуха в прибрежных водах и на поверхности континента от Аляски до Калифорнии. Во время положительной фазы западная часть Тихого океана становится холоднее, а часть восточного океана нагревается; во время отрицательной фазы восточная часть

Тихого океана становится холодной, а количество осадков – выше среднего (рис. 1).

Выявлены достаточно тесные связи между шириной годичного кольца и климатическими осцилляциями. Например, зимние индексы САК могут быть реконструированы на основе ширины годичных колец деревьев, произрастающих в Средиземноморском регионе (D'Arrigo et al., 1993; Cook et al., 1998, 2019; Piovesan, Schirone, 2000). Существуют реконструкции индексов циркуляции весеннего и летнего периодов на основе ширины годичного кольца и изотопного состава колец у деревьев, произрастающих в высоких широтах, что указывает на достаточно тесные связи между САК, АО, ТДО и годичными кольцами (D'Arrigo et al., 2003; Gray et al., 2004; Dinis et al., 2019; Churakova Sidorova et al., 2021).

В высоких широтах биота особенно чувствительна к климатическим колебаниям. Одна из климатических характеристик высоких широт – повторяемость экстремальных климатических явлений, таких как короткий/холодный вегетационный период, который может быть зарегистрирован в годичных кольцах деревьев в виде светлых колец. Светлые кольца – это годичные кольца, характеризующиеся не до конца сформированной зоной поздней древесины: без выраженной зоны поздней древесины, очень узкой зоной поздней древесины или поздняя древесина с тонкостенными незрелыми клетками (Гурская, Бенькова, 2013).

Однако влияние атмосферной циркуляции на частоту и интенсивность формирования светлых колец в Сибирской Субарктике до сих пор не исследовано. Эта работа посвящена выявлению связей между частотой, интенсивностью и пространственным распределением светлых колец и разными типами атмосферной внетропической циркуляции.

Район исследования, материалы и методы

Район исследования находится в зоне вечной мерзлоты на северном пределе распространения лиственницы от Полярного Урала до реки Колыма, составляя около 4000 км, а точки взятия образцов расположены на расстоянии 250–300 км (рис. 2, таблица).

В общем, для климатических условий региона характерны короткий вегетационный сезон (6–10 недель), невысокая температура самого жаркого месяца июля (около 12–14 °С), небольшое количество осадков (250–350 мм) и низкое испарение, что ведет к заболачиванию понижений рельефа; почвы бедные торфяно-глеевые или торфяно-подзолистые. В Западной Сибири годовая амплитуда температуры составляет около 49 °С, среднегодовое количество осадков не превышает 400 мм, а на севере Восточной Сибири годовая амплитуда температуры достигает в среднем 59 °С, а количество осадков – до 200 мм. Осадки



Рис. 2. Район исследования. Точки – места сбора образцов. Красные линии – границы зон Сибири. Овалы – границы ареалов видов лиственницы

Fig. 2. Study area. Blue dots – sampling sites; red lines – boundaries between Western, Middle and Eastern Siberia; ovals – range of larch populations

Таблица. Характеристики точек сбора. L.s. – *Larix sibirica*, L.g. – *L. gmelinii*, L.c. – *L. cajanderi*Table. Sampling site characteristics. L.s. – *Larix sibirica*, L.g. – *L. gmelinii*, L.c. – *L. cajanderi*

Код хронологии	широта	долгота	Высота над ур.м., м	Вид	Начальный год	Длина хронологии	Число кернов
Западная Сибирь							
1	67°33′	67°32′	35	L.s.	1940	69	25
2	66°57′	66°40′	100	L.s.	1838	163	50
3	66°40′	66°19′	60	L.s.	1832	169	50
4	68°08′	79°46′	30	L.s.	1562	429	18
5	68°07′	85°03′	50	L.s.	1553	438	20
Средняя Сибирь							
6	69°23′	86°13′	20	L.s.	1925	85	21
7	70°31′	89°30′	70	L.s.	1615	376	20
8	71°20′	93°50′	70	L.g.	1540	451	24
9	72°27′	101°45′	20	L.g.	1644	347	20
10	71°54′	111°02′	25	L.g.	1570	421	20
11	71°42′	118°35′	80	L.g.	1600	391	23
12	71°06′	127°17′	70	L.g.	1425	567	22
Восточная Сибирь							
13	70°57′	132°59′	20	L.c.	1518	474	21
14	70°15′	138°10′	80	L.c.	1301	691	22
15	70°30′	148°08′	20	L.c.	1425	670	21
16	69°28′	152°06′	30	L.c.	1414	581	26
17	69°17′	154°46′	50	L.c.	1412	580	22
18	67°12′	165°06′	470	L.c.	1568	424	20
19	67°28′	167°40′	450	L.c.	1420	572	20

выпадают в основном в летний период. Высота снежного покрова в среднем составляет не более 30 см, достигая высоты до 90 см на отдельных местообитаниях в Западной Сибири и не превышая 30 см в Восточной. Лиственница формирует здесь редины и редколесья с нормальным режимом увлажнения за счет воды, поступающей как с осадками, так и за счет сезонного оттаивания многолетнемерзлотных пород (Природные условия, 1963, 1964, 1965).

Уменьшение количества осадков и увеличение континентальности климата с продвижением с запада на восток ведет к изменению видового состава лиственниц.

В Западной Сибири лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) произрастает совместно с елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), тогда как в Средней Сибири встречается лиственница Гмелина (*L. gmelinii* (Rupr.) Rupr.), а еще восточнее – лиственница Каяндера (*L. cajanderi* Mayr) (Абаимов, 1997).

Сбор образцов древесины проведен на модельных деревьях без внешних повреждений, здоровых, прямоствольных, отдельно стоящих, произрастающих в свежих местообитаниях (с нормальным режимом увлажнения почвы), ровных или с небольшим уклоном (до 5°). На каждой точке собрано по 20–50 кернов на высоте ствола 1,3 м. Образцы были

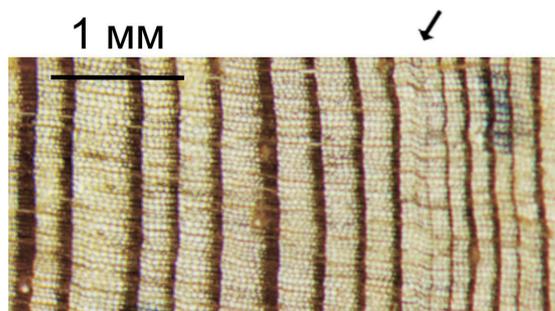


Рис. 3. Светлое кольцо (зона поздней древесины указана стрелкой) у лиственницы. Увеличение 20х

Fig. 3. Light rings in larch; latewood is indicated by an arrow. Magnification x20

перекрестно датированы на основе хронологий по ширине годовых колец с использованием программ TSAP (Rinn, 2003) и COFECHA (Holmes, 1994). Светлые кольца выявляли визуально под микроскопом на основе разницы в окраске между прилежащими кольцами (рис. 3).

Для каждой точки сбора материала был определен процент светлых колец от общего числа колец в отдельный год и построены точные хронологии светлых колец. Для каждой точки в каждой точечной хронологии исключили случаи, где количество светлых колец было менее 10 % (один случай на десять и более колец), так как такие кольца могли быть неклиматической природы (Gurskaya, 2019). Затем точечные хронологии были объединены простым арифметическим осреднением в обобщенные хронологии по светлым кольцам для каждого вида лиственницы (рис. 4). Вторым использованным подход – построение хронологий на основе пространственного распределения светлых колец. Для каждого вида лиственницы была определена доля местообитаний от общего числа точек, на которых проявился сигнал в виде светлых колец (рис. 5).

Длина имеющихся рядов данных, построенных на основании прямых расчетов разницы в давлении между точками, раз-

лична в настоящее время. Поэтому данные по атмосферной циркуляции были взяты на интернет-ресурсе Королевского метеорологического института Нидерландов <http://climexp.knmi.nl>. В работе был использован общий период с 1900 по 2010 г. как по хронологиям светлых колец, так и по типам атмосферных осцилляций.

Коэффициенты корреляции Пирсона рассчитаны в программе Statistica 8.0 для периода с сентября предшествующего года, по август текущего.

Результаты

Хронологии светлых колец

В хронологиях, основанных как на количестве светлых колец, так и на их пространственном распределении, можно отметить периоды, когда светлые кольца образуются массово или на большой территории. В то же время есть периоды, когда светлых колец мало или они редко встречаются (рис. 4). У лиственницы сибирской, произрастающей в Западной Сибири, периоды массового формирования светлых колец приурочены в 1900–1930 и с 1990 по 2000 г., в эти периоды формируется около шести светлых колец в десятилетие. В период 1930–1970 гг. светлые кольца у лиственницы сибирской формируются значительно реже, в среднем по три

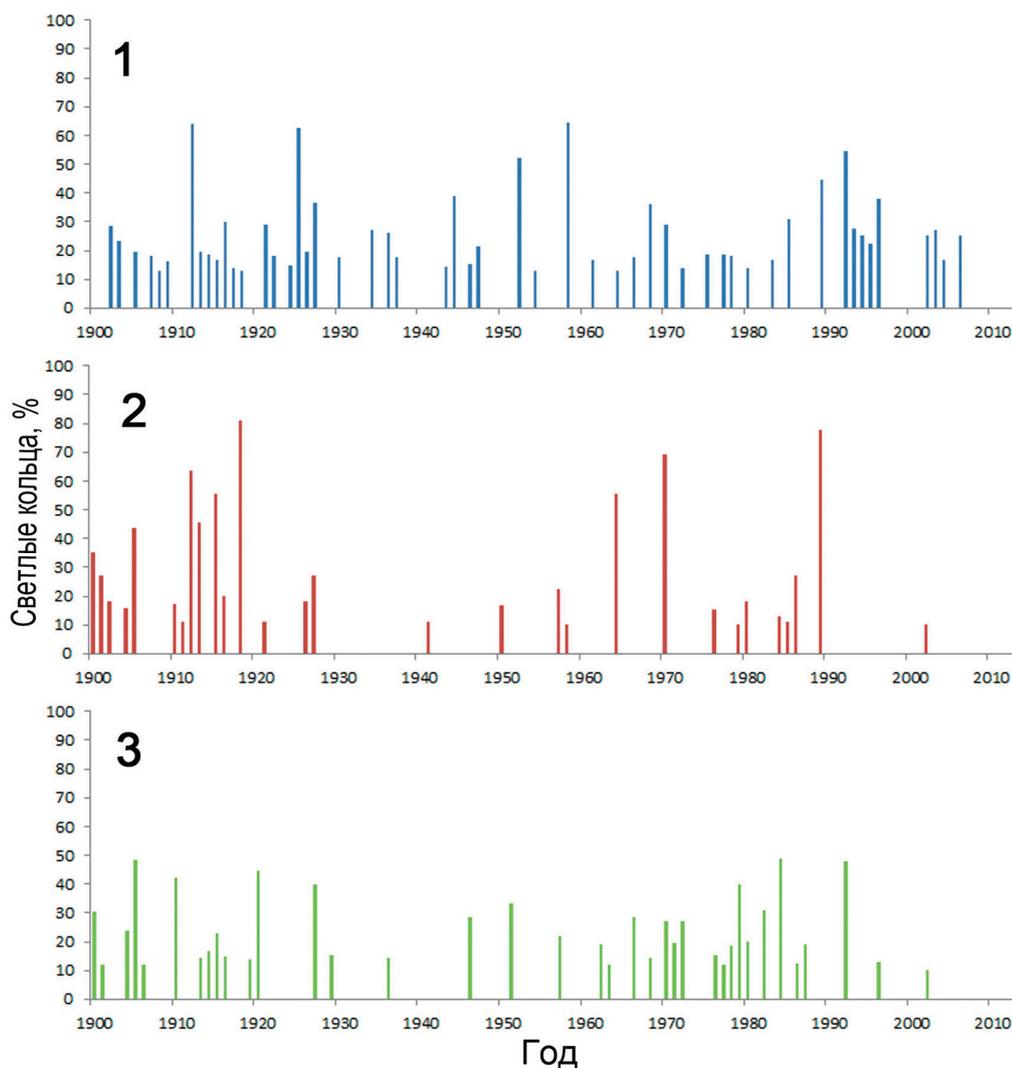


Рис. 4. Хронологии светлых колец (частота встречаемости в % от общего числа проанализированных ядер) трех видов лиственницы: 1 – *Larix sibirica*, 2 – *L. gmelinii*, 3 – *L. cajanderi*

Fig. 4. Chronologies of light rings (% of the number of tree rings for each year) of three larch species: 1 – *Larix sibirica*, 2 – *L. gmelinii*, 3 – *L. cajanderi*

кольца в десятилетие. В остальные периоды отмечено по 3–4 светлых кольца в десятилетие. У лиственницы Гмелина светлые кольца встречаются часто в периоды 1900–1930 и 1980–1990 гг. (чаще четырех раз в десятилетие), а в периоды с 1930 по 1950 и с 1960 по 1970 гг. светлые кольца формируются не чаще одного раза в десятилетие. На севере Восточной Сибири также выделяются периоды 1900–1920 и 1970–1990 гг., когда светлые

кольца формируются часто у лиственницы Каяндера.

При анализе пространственного распределения светлых колец у лиственницы сибирской можно выделить периоды, когда светлые кольца выявляются массово на большинстве местообитаний (более, чем на двух), это 1900–1910, 1920–1930, 1970–1980, 1990–2000 гг., у лиственницы Гмелина эти периоды менее выражены, но тоже могут быть от-

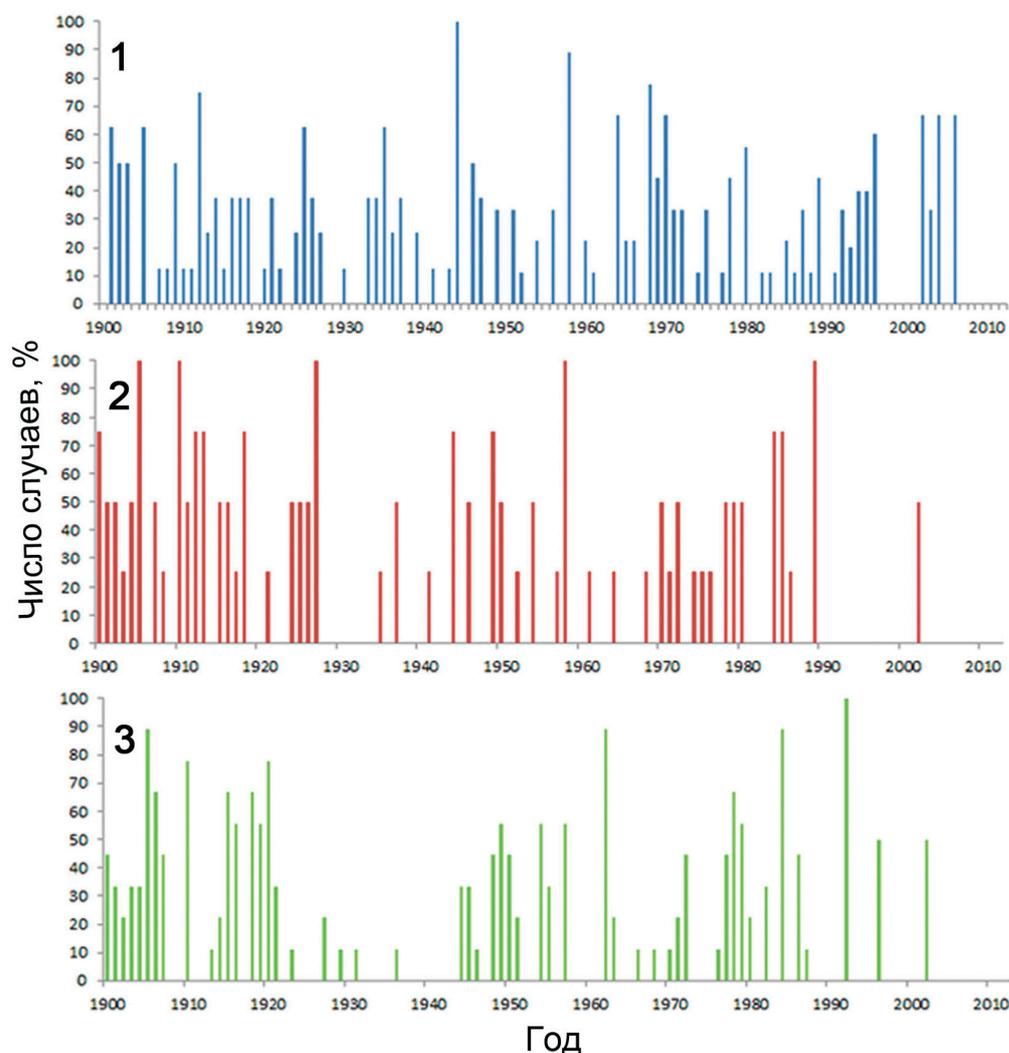


Рис. 5. Хронологии светлых колец (доля мест сбора образцов, на которых выявлены светлые кольца, в процентах от их общего числа) трех видов лиственницы: 1 – *Larix sibirica*, 2 – *L. gmelinii*, 3 – *L. cajanderi*

Fig. 5. Chronology of larch light rings (% of sampling sites where light rings were found): 1 – *Larix sibirica*, 2 – *L. gmelinii*, 3 – *L. cajanderi*

мечены в 1900–1910, 1920–1930, 1950–1960, 1970–1990 гг., у лиственницы Каяндера это 1900–1920, 1945–1955, 1970–1990 гг. Таким образом, в течение XX столетия существуют периоды, когда у лиственницы, произрастающей на северном пределе распространения, массово формируются светлые кольца. Некоторые из этих периодов характерны для всех видов лиственницы в любой зоне Сибири, например начало XX в.– 1900–1930 гг. и ко-

нец XX в.– 1970–2000 гг. В то же время есть периоды, когда светлые кольца формируются редко.

Во всех хронологиях выделяются годы с аномально массовым формированием светлых колец (более 40 % от общего числа колец). В Западной Сибири это 1912, 1925, 1958 и 1992 гг., в Средней – 1912, 1918, 1952, 1964, 1970 и 1989 гг., в Восточной – 1905, 1910, 1920, 1970 и 1984 гг.

Связи хронологий светлых колец
с типами осцилляций

Исходя из того, что существуют периоды, когда светлые кольца массово и часто отмечаются, логично предположить, что на их формирование влияют долговременные изменения в природно-климатических условиях. Коэффициенты корреляции между хронологиями массового формирования светлых колец и различными типами осцилляций показали значимые положительные связи с индексом САК сентября предшествующего года у лиственницы сибирской и Гмелина и октября предшествующего года у лиственницы Каяндера (рис. 6. a1, b1).

Отрицательные корреляционные связи хронологий светлых колец лиственницы Гмелина выявлены с индексом АО августа, а для хронологии лиственницы Каяндера из Вос-

точной Сибири отрицательные связи отмечены с индексом ТДО (рис. 6. a2, a3).

В хронологиях по пространственному распределению светлых колец не выявлены отрицательные связи с САК ни у одного вида лиственницы. Влияние АО проявляется в июле текущего года и в сентябре-октябре предшествующего года у лиственницы Гмелина и Каяндера, и в июне выявлены отрицательные связи с индексами ТДО у этих же видов (рис. 6b). Кроме этого, индексы ТДО сентября предшествующего года имеют отрицательные связи со светлыми кольцами у лиственницы Каяндера.

Отдельные годы с массовым формированием светлых колец обычно следуют в течение одного-двух лет после крупных извержений вулканов с $VEI \geq 4$. Например, 1904 г. – Санта-Мария, 1907 г. – Ксудач, 1912 г. – Новаруп-

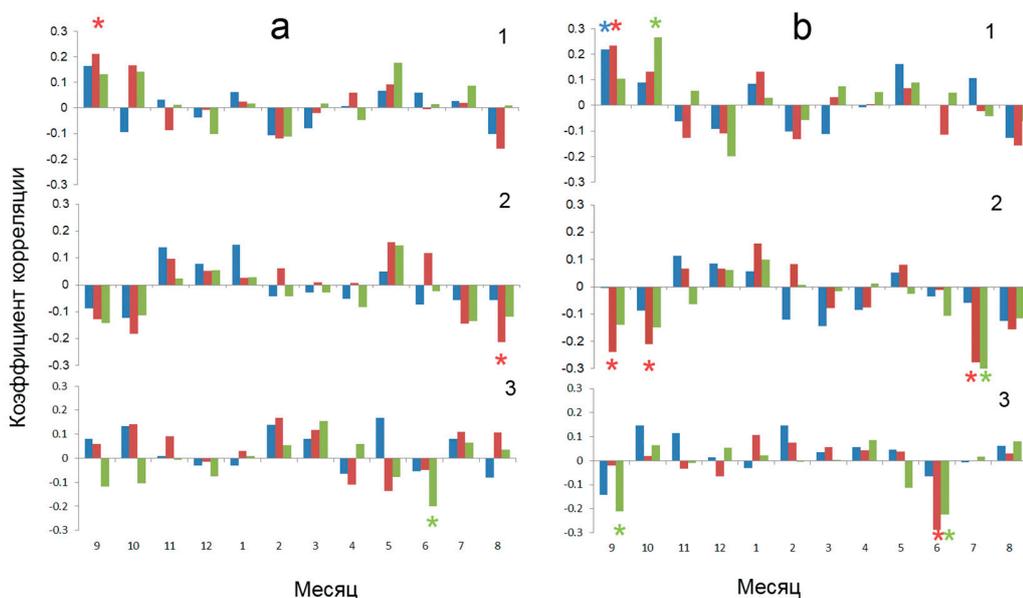


Рис. 6. Корреляции между типами осцилляций (1 – САК, 2 – АО, 3 – ТДО) и хронологиями светлых колец (а – по максимальному количеству колец, б – по пространственному распределению). Синий – лиственница сибирская, красный – лиственница Гмелина, зеленый – лиственница Каяндера. Звездочкой отмечены значимые корреляции $p\text{-level} \leq 0,05$

Fig. 6. Correlations between the types of atmospheric oscillations (1 – NAO, 2 – AO, 3 – TDO) and chronologies of light rings (a – mass light ring formation, b – spatial distribution). Blue – *Larix sibirica*, Red – *L. Gmelinii*, Green – *L. Kajaniderii*. Asterisks indicate significant correlations $p\text{-level} \leq 0.05$

та, 1916 г. – Серро-Азул, 1924 г. – Райкоке, 1966 г. – Келюд и Аву, 1968 г. – Фернандина, 1982 г. – Эль Чичон, 1983 г. – Коло, 1986 г. – Августин и Чикурачки, 1991 г. – Пинатубо и Серро-Хадсон. Однако в эти годы и в годы с массовым формированием светлых колец средние значения индексов осцилляций стремятся к нейтральным значениям (рис. 7).

Обсуждение результатов

Достаточно беглого взгляда на хронологию светлых колец, полученные любым способом, чтобы заметить, что частота формирования светлых колец непостоянна в разные временные периоды на протяжении XX в., это явление характерно для всех видов лиственницы, произрастающей на северном переделе

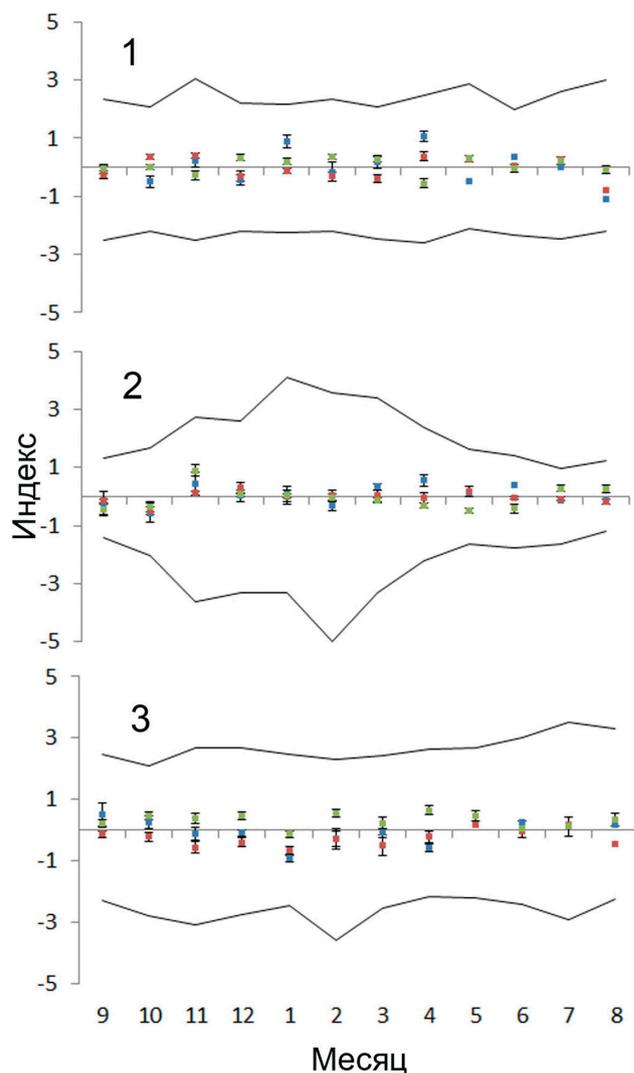


Рис. 7. Максимальные значения индексов разных типов осцилляций (черные линии, 1 – САК, 2 – АО, 3 – ТДО) и средние значения индексов в годы массового формирования светлых колец у лиственниц. Цветовая схема как на рис. 6.

Fig. 7. Maximum values of atmospheric oscillation indices (black lines) and averaged indices for the years of mass light rings formation in larches (color scheme as in Fig. 6): 1 – NAO, 2 – AO, 3 – TDO

распространения в Сибири. Длительные периоды как с высокой, так и с низкой частотой формирования светлых колец не могут быть объяснены влиянием каких-либо краткосрочных экстремальных погодных явлений (таких как извержения вулканов, вспышки насекомых вредителей), а связаны, скорее всего, с долгосрочными изменениями климатических условий произрастания. Одним из таких факторов могут быть климатические осцилляции, наблюдаемые в разных частях планеты.

В летние периоды влияние осцилляций на изменчивость климатических условий в высоких широтах снижается, так как перепады температуры между полюсами и тропиками несколько выравниваются. В целом получено, что атмосферные осцилляции в среднем определяют до 30 % изменчивости температуры в высоких широтах, при этом минимальный вклад в динамику температуры вносит САК (Popova, 2009). Однако, несмотря на это, связи между типами осцилляций и хронологиями светлых колец были отмечены по всей Сибирской Субарктике.

Светлые кольца у лиственницы сибирской, которая произрастает в западной части Сибири, формируются под влиянием положительной фазы САК. Положительные связи между САК предшествующего года и светлыми кольцами могут быть интерпретированы следующим образом: теплые влажные условия осени, которые создает САК в своей положительной фазе в Скандинавии, на европейской территории России и частично в Западной и Средней Сибири могут способствовать увеличению снегонакопления в осенне-зимний период. В результате этого весной разрушение снежного покрова может происходить несколько дольше, что сокращает длительность вегетационного периода и влияет на процессы формирования годич-

ного кольца (Vaganov et al., 1999; Kirdyanov et al., 2003). Кроме этого, не исключено ухудшение процессов перераспределения и запасаания углеводов при подготовке к периоду покоя. Влияние условий осени, в частности температуры, на формирование ширины годичного кольца у разных видов хвойных деревьев показано для некоторых местообитаний в Западной Сибири (Gurskaya et al., 2012). Следовательно, связи между формированием светлых колец и САК осени предшествующего года потенциально могут существовать в Западной Сибири.

Влияние САК на формирование светлых колец у лиственницы Каяндера затруднительно объяснить исходя из имеющихся данных. Возможно, это либо ошибка статистических расчетов, либо проявление планетарного дистанционного влияния между разными типами осцилляций (Rogers, 1984; Kucharski et al., 2006; Song et al., 2009; Sun et al., 2015).

Формирование светлых колец у лиственницы, произрастающей в Средней Сибири, увеличивается, когда АО находится в своей отрицательной фазе. На лиственницу Гмелина АО оказывает наиболее сильное влияние. В Средней Сибири, где произрастает лиственница Гмелина, влияние САК и ТДО существенно уменьшается, а АО остается основным типом осцилляции, которое может влиять на формирование структуры годичных колец. Влияние АО августа на формирование светлых колец у лиственницы Гмелина подтверждает, что светлые кольца массово образуются в результате арктического вторжения воздуха в отрицательную фазу АО. При этом арктическое вторжение может быть как осенью предыдущего года и влияет на переход деревьев в период покоя, так и в летнее время, в период, когда наблюдается активное формирование поздней древесины. Холодный воздух в период преобладания отрицательной

фазы затекает с высоких широт Арктики, сокращает вегетационный период на несколько дней или даже недель.

Различия в корреляционных связях (в знаке связи и значимых месяцах) между хронологиями светлых колец и САК и АО подтверждают, что, несмотря на возможную дистанционную взаимосвязь между этими типами осцилляций (Hu, Guan, 2018), они оказывают различное воздействие на формирование структуры годичных колец у лиственницы, произрастающей в Западной и Средней Сибири. Это скорее всего обусловлено различиями в распределении приповерхностной температуры и влажности воздуха в зависимости от типа циркуляции.

ТДО в основном влияет на частоту формирования светлых колец лиственницы Каяндера, произрастающей на севере Восточной Сибири. В положительной фазе ТДО светлых колец формируется меньше, чем в отрицательной, а основным месяцем, влияющим на формирование светлого кольца, является июнь. В этот период годичные кольца и зона поздней древесины у лиственницы Каяндера чувствительны к условиям внешней среды, в частности к температуре воздуха (Ваганов и др., 1996; Gurskaya, 2019). В отрицательную фазу ТДО наблюдается перенос теплого и сухого воздуха с Тихого океана на материк. Однако именно эти условия создают более холодные условия и выраженный дефицит влажности в высоких широтах Восточной Сибири, которые в июне могут влиять на формирование материнских клеток ксилемы поздней древесины.

Кроме влияния отрицательной фазы АО и ТДО на формирование светлых колец, которое может длиться несколько десятилетий, имеет значение и краткосрочное изменение термического режима вследствие извержения вулканов (Gurskaya, 2017, 2019). Извержения

вулканов ведут к усилению частоты встречаемости светлых колец в древесине лиственницы в отдельно взятые годы (например, 1912, 1970, 1984, 1992) как на большой территории, так и на отдельно взятых местообитаниях. В годы массового формирования светлых колец значения индексов осцилляций не оказывают существенного влияния на структуру годичного кольца, так как значения индексов стремятся к нулю. Более того, подобные годы отмечены в периоды, когда осцилляции меняют знак своей фазы на противоположный. Разница в давлении между тропическими и внетропическими широтами в такие переходные периоды минимальная, следовательно, любые типы осцилляции оказывают наименьшее влияние на климатические условия. Таким образом, извержения вулканов или иные экстремальные краткосрочные природные события оказывают существенное влияние на массовое формирование светлых колец за счет снижения средних планетарных значений температуры воздуха (до 1,5 °C (Sigl et al., 2015)), а воздействие атмосферных осцилляций исключается или существенно уменьшается. Атмосферные осцилляции оказывают влияние в долгосрочной перспективе, изменяя частоту формирования светлых колец в течение десятилетий, но при этом не влияют на их массовое формирование.

Заключение

В высоких широтах Сибири светлые кольца формируются с определенной периодичностью. В хронологиях светлых колец, построенных как по признаку массового формирования в течение одного года, так и по признаку массового пространственного распределения, выделяются периоды как с высокой частотой формирования светлых колец, так и с редкими случаями на протяжении десятилетия. Изменения в частоте

формирования светлых колец приурочены к изменению климатических периодов. В частности, выявлены связи хронологий светлых колец с различными типами атмосферных осцилляций. Формирование светлых колец у лиственницы сибирской зависит от индекса Северо-Атлантической осцилляции сентября предшествующего года, возможно, за счет увеличения толщины и медленного разрушения снежного покрова. У лиственницы Гмелина светлые кольца формируются под влиянием вторжения холодных воздушных масс в июле, в те периоды, когда арктическая осцилляция находится в своей отрицательной фазе. Светлые кольца лиственницы Каяндера формируются в годы с отрицательной фазой тихоокеанской декадной осцилляции. Вероятно, это связано

с блокирующими процессами и вытеснением холодных воздушных масс в высокие широты.

Таким образом, существуют климатические периоды, обусловленные динамикой разницы атмосферного давления между регионами, когда происходит перераспределение температуры, осадков и облачности, что ведет к более частому или более редкому формированию светлых колец у лиственницы, произрастающей в Сибирской лесотундре.

Вулканические извержения и другие краткосрочные природные экстремальные явления увеличивают массовость формирования светлых колец в отдельно взятый год и на большой территории, но в эти годы атмосферная циркуляция не оказывает существенного влияния.

Список литературы / References

Абаимов А. П. (1997) *Лиственничные леса и редколесья Севера Сибири: Разнообразие, особенности экологии и лесообразовательного процесса*. Автореф. дисс. ... доктора биол. наук. Новосибирск [Abaimov A. P. (1997) *Larch forests and woodlands in the north of Siberia: Biodiversity, ecological features and forest formation*. Abstract of thesis. diss. for the degree of Doctor of Biol. sciences. Novosibirsk (in Russian)]

Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. (1996) *Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике*. Новосибирск, Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 246 с. [Vaganov E. A., Shiyatov S. G., Mazepa V. S. (1996) *Dendroclimatic study in Ural-Siberian subarctic*. Novosibirsk, Nauka, Siberian publishing firm RAS, 246 p. (in Russian)]

Гурская М. А., Бенькова В. Е. (2013) Типы светлых колец у *Larix sibirica* и *L. gmelinii* на верхней границе леса в Урало-Сибирской Субарктике. *Ботанический журнал*, 98(8): 1037–1054 [Gurskaya M. A., Benkova V. E. (2013) Types of light rings in wood of *Larix sibirica* and *L. Gmelinii* at upper tree-line in the Ural-Siberian subarctic. *Botanical Journal* [Botanicheskii Zhurnal], 98(8): 1037–1054 (in Russian)]

Природные условия и естественные ресурсы СССР. Западная Сибирь (1963) М., Издательство АН СССР, 488 с. [*Natural conditions and natural resources of the USSR. Western Siberia* (1963) Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 488 p. (in Russian)]

Природные условия и естественные ресурсы СССР. Средняя Сибирь (1964) М., Издательство АН СССР, 492 с. [*Natural conditions and natural resources of the USSR. Middle Siberia* (1964) Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 492 p. (in Russian)]

Природные условия и естественные ресурсы СССР. Якутия. Том 4 (1965) М., Издательство АН СССР, 464 с. [*Natural conditions and natural resources of the USSR. Yakutia. Volume 4* (1965) Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 464 p. (in Russian)]

- Barnston A. G., Livezey R. E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115(6): 1083–1126
- 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., D'Arrigo R.D., Briffa K. R. (1998) A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from North America and Europe. *Holocene*, 8(1): 9–17
- Cook E. R., Kushnir Y., Smerdon J. E., Williams A. P., Anchukaitis K. J., Wahl E. R. (2019) A Euro-Mediterranean tree-ring reconstruction of the winter NAO index since 910 C.E. *Climate Dynamics*, 53(3–4): 1567–1580
- D'Arrigo R.D., Cook E. R., Jacoby G. C., Briffa K. R. (1993) NAO and sea surface temperature signatures in tree-ring records from the North Atlantic sector. *Quaternary Science Reviews*, 12(6): 431–440
- D'Arrigo R.D., Cook E. R., Mann M. E., Jacoby G. C. (2003) Tree-ring reconstructions of temperature and sea-level pressure variability associated with the warm-season Arctic Oscillation since AD 1650. *Geophysical Research Letters*, 30(11): 1549
- Dinis L., Bégin C., Savard M.M., Marion J., Brigode P., Alvarez C. (2019) Tree-ring stable isotopes for regional discharge reconstruction in eastern Labrador and teleconnection with the Arctic Oscillation. *Climate Dynamics*, 53(5–6): 3625–3640
- Gray S. T., Graumlich L. J., Betancourt J. L., Pederson G. T. (2004) A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 AD. *Geophysical Research Letters*, 31(12): L12205
- 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. (2019) Effect of summer monthly temperatures on light tree ring formation in three larch species (*Larix*) in the northern forest–tundra of Siberia. *Russian Journal of Ecology*, 50(4): 343–351
- Gurskaya M., Hallinger M., Singh J., Agafonov L., Wilmking M. (2012) Temperature reconstruction in the Ob River valley based on ring widths of three coniferous tree species. *Dendrochronologia*, 30(4): 302–309
- Holmes R. L. (1994) *Dendrochronology program library. Users Manual*. University of Arizona, Tucson
- Hu D., Guan Z. (2018) Decadal relationship between the stratospheric Arctic vortex and Pacific decadal oscillation. *Journal of Climate*, 31(9): 3371–3386
- Kirilyanov A., Hughes M., Vaganov E., Schweingruber F., Silkin P. (2003) The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic. *Trees*, 17(1): 61–69
- Kucharski F., Molteni F., Bracco A. (2006) Decadal interactions between the western tropical Pacific and the North Atlantic Oscillation. *Climate Dynamics*, 26(1): 79–91
- Piovesan G., Schirone B. (2000) Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *International Journal of Biometeorology*, 44(3): 121–127
- Popova V. (2009) Modern temperature changes of near surface air in the North of Eurasia: Regional tendencies and role of atmospheric circulation. *Izvestiya Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 6: 59–69 (in Russian)

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>

Rogers J.C. (1984) The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the northern hemisphere. *Monthly Weather Review*, 112(10): 1999–2015

Sigl M., Winstrup M., McConnell J.R., Welten K. C., Plunkett G., Ludlow F., Büntgen U., Caffee M., Chellman N., Dahl-Jensen D., Fischer H., Kipfstuhl S., Kostick C., Maselli O.J., Mekhaldi F., Mulvaney R., Muscheler R., Pasteris D.R., Pilcher J.R., Salzer M., Schüpbach S., Steffensen J.P., Vinther B.M., Woodruff T.E. (2015) Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature*, 523(7562): 543–549

Song J., Li C., Zhou W., Pan J. (2009) The linkage between the Pacific-North American teleconnection pattern and the North Atlantic Oscillation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(2): 229–239

Sun C., Li J., Feng J., Xie F. (2015) A decadal-scale teleconnection between the North Atlantic Oscillation and subtropical eastern Australian rainfall. *Journal of Climate*, 28(3): 1074–1092

Thompson D.W.J., Wallace J.M. (1998) The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 25(9): 1297–1300

Vaganov E. A., Hughes M. K., Kirilyanov A. V., Schweingruber F.H., Silkin P.P. (1999) Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, 400(6740): 149–151

Walker G.T. (1923) Correlation in seasonal variation of weather. VIII: A preliminary study of world weather. *Memoirs of the India Meteorological Department*, 24: 75–131

Walker G.T., Bliss E.W. (1932) World weather V. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 4(36): 53–84

DOI 10.17516/1997-1389-0382

УДК 630*561.24:582.475(571.513)

Detailing the Climatic Response of Wood Anatomical Traits and Xylogenesis Phenology of Scots Pine in the Forest-Steppes of Southern Siberia

Anastasia V. Demina^a,
Dina F. Zhirnova^{*a}, Liliana V. Belokopytova^a,
Keshav K. Upadhyay^b and Elena A. Babushkina^a

^aKhakass Technical Institute
Siberian Federal University
Abakan, Russian Federation

^bMizoram University
Aizwal, India

Received 03.04.2022, received in revised form 23.05.2022, accepted 21.06.2022

Abstract. Semi-arid forests of continental Asia are sensitive to the moisture deficit, and, thus, tree rings in these regions can serve as long-term climatic proxies. At the same time, wood anatomy is promising for detailing the recorded climatic signal and as an indicator of the phenology of xylogenesis. In this study, we compared the sets of chronologies obtained using a new method of indexing for mean and maximum values of the radial cell size, D , and the cell wall thickness, CWT , of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the forest-steppe habitats of Khakassia (southern Central Siberia), and southern Buryatia (Eastern Siberia), where climate is more continental and harsh. During indexing, the nonlinear dependences of D and CWT on cell number in the radial row of the ring, N , were removed to divide the climatic signal into the components recorded during the consecutive stages of xylogenesis. The stability of the N dependence was confirmed for radial growth (linear function, close to direct proportionality, $R^2 > 0.93$), D , and CWT (negative exponential function with saturation, $R^2 = 0.11–0.83$). The adaptation of pine wood to the climatic peculiarities of south Buryatia is evident as the smaller tracheid size but thicker cell walls compared with Khakassia. The response of radial growth and indexed cell chronologies to temperature and precipitation is similar in both regions, but in Buryatia the response to temperature is less pronounced (since the summer is cooler) and the main maxima of dendroclimatic correlations are shifted to later periods. It has been suggested that the delay in the onset of pine xylogenesis in Buryatia

© 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: dina-zhirnova@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5189-5700 (Zhirnova D.); 0000-0002-8475-7304 (Belokopytova L.); 0000-0002-5519-1225 (Upadhyay K.); 0000-0002-1355-4307 (Babushkina E.)

is rather associated with the dry weather in May–June than with lower temperatures, and during all of the growth season, phenological shifts are maintained by internal mechanisms and spatial differences between provenances.

Keywords: Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), tree rings, quantitative wood anatomy, climatic signal.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR (project No. 20–016–00049) and the Ministry of Science and Higher Education, RF (FSRZ-2020–0010).

Citation: Demina A. V., Zhirnova D. F., Belokopytova L. V., Upadhyay K. K., Babushkina E. A. Detailing the climatic response of wood anatomical traits and xylogensis phenology of Scots pine in the forest-steppes of southern Siberia. *J. Sib. Fed. Univ. Biol.*, 2022, 15(2), 183–201. DOI: 10.17516/1997-1389-0382

Детализация климатического отклика анатомических параметров древесины и фенологии ксилогенеза сосны обыкновенной в лесостепях юга Сибири

А. В. Демина^а, Д. Ф. Жирнова^а,
Л. В. Белокопытова^а, К. К. Упадхай^б, Е. А. Бабушкина^а

^аХакасский технический институт –
филиал Сибирского федерального университета
Российская Федерация, Абакан
^бУниверситет Мизорама
Индия, Аиджал

Аннотация. Чувствительность к недостатку увлажнения семиаридных лесов континентальной Азии позволяет использовать годовые кольца деревьев этих регионов как косвенные источники климатических данных. При этом использование анатомии древесины перспективно для детализации записанного климатического сигнала и как индикатор фенологии ксилогенеза. В данном исследовании сравнили полученные с помощью нового оригинального метода индексации наборы хронологий средних и максимальных значений радиального размера клеток D и толщины клеточной стенки CWT сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из лесостепных местообитаний Хакасии (юг Средней Сибири) и юга Бурятии (Восточная Сибирь), где климат более континентальный и суровый. При индексации проведено удаление нелинейных зависимостей D и CWT от количества клеток в радиальном ряду N для разделения компонент климатического сигнала, записанных в течение последовательных стадий ксилогенеза. Стабильность зависимостей от N подтверждена для радиального прироста (линейная, близкая к прямой пропорциональности, $R^2 > 0,93$), D и CWT (отрицательная экспонента с насыщением, $R^2 = 0,11–0,83$). Приспособление древесины сосны к особенностям климата на юге Бурятии проявляется в меньших размерах

трахеид, но более толстых клеточных стенках по сравнению с Хакасией. Отклик радиального прироста и индексированных клеточных хронологий на температуру и осадки аналогичен в обоих регионах, но в Бурятии менее выражен отклик на температуру (так как менее жаркое лето) и основные максимумы дендроклиматических корреляций сдвинуты на более поздние сроки. Выдвинуто предположение, что задержка начала ксилогенеза сосны в Бурятии связана не столько с более низкими температурами, сколько с засушливостью мая-июня, а к концу сезона фенологические сдвиги поддерживаются за счет внутренних механизмов и пространственного различия между климатипами.

Ключевые слова: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), годовые кольца, количественная анатомия древесины, климатический сигнал.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 20–016–00049) и Министерства образования и науки РФ (проект FSRZ-2020–0010).

Цитирование: Демина, А. В. Детализация климатического отклика анатомических параметров древесины и фенологии ксилогенеза сосны обыкновенной в лесостепях юга Сибири / А. В. Демина, Д. Ф. Жирнова, Л. В. Белокопытова, К. К. Упадхай, Е. А. Бабушкина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 183–201. DOI: 10.17516/1997-1389-0382

Введение

Особенности роста и развития лесных экосистем в континентальном умеренном поясе Центральной Азии характеризуются дефицитом увлажнения в течение сезона роста в сочетании с широким диапазоном изменчивости температур (Алисов, 1956; Rivas-Martínez et al., 2002; Dulamsuren et al., 2009, 2014). В таких условиях деревья постоянно находятся на грани стресса, а нестабильность осадков увеличивает риск засух (Davi et al., 2010; Fang et al., 2010; Babushkina et al., 2019a; Zhirnova et al., 2020; Demina et al., 2022). Особенный интерес здесь вызывает сибирский лесостепной экотон, который может быть необычайно чувствительным к изменению климата из-за прогнозируемой скорости потепления выше среднего (Gordon et al., 2000; Чебакова, Парфенова, 2006; Groisman, Gutman, 2012; Liu et al., 2013; Churakova et al., 2020), влекущей за собой увеличение интенсивности и частоты экстремальных климатических событий, в том числе засух (Tabakova et al., 2020).

Все это позволяет получать высокочувствительные к таким колебаниям древесно-кольцевые хронологии и использовать их как косвенные источники информации о климатической динамике (Esper et al., 2016; Riechelmann, Gouw-Bouman, 2019; Ljungqvist et al., 2020). Однако ширина годовых колец как интегральная характеристика с погодичным разрешением обобщает климатический отклик за весь сезон, не позволяя судить о его внутрисезонной изменчивости (Büntgen, 2019). Поэтому рассмотрение других характеристик годовых колец дает возможность получить более детализированную информацию для дендроклиматического анализа за короткие внутрисезонные временные интервалы (Panyushkina et al., 2003; Fonti et al., 2010; Wang et al., 2011). В частности, среди анатомических параметров клеток древесины использование результирующих характеристик последовательных этапов ксилогенеза может обеспечить высокое временное разрешение (Castagneri et al., 2017; Belokopytova et al., 2019).

Детализация климатического отклика может помочь выявить механизмы влияния пространственных и/или временных климатических изменений (градиентов, трендов и флуктуаций) и на фенологию ксилогенеза. В частности, последствия изменения климата включают в себя фенологические сдвиги, влияющие на рост и продуктивность деревьев вплоть до риска их гибели (Borchert et al., 2002; Menzel, 2002; Cleland et al., 2007; Rich et al., 2008; Misson et al., 2011; Swidrak et al., 2013; Allen et al., 2015 и др.). Поэтому понимание механизмов климатического воздействия, выявление критических временных интервалов роста и развития растений важны для оценки стратегии адаптации древесных видов и сдвига границ их ареалов.

В частности, хронологии анатомических параметров древесины сосны обыкновенной на нижней границе произрастания длительностью более 250 лет, полученные для семи-аридного региона Южной Сибири, Хакасско-Минусинской котловины, и предложенный

новый метод их индексирования позволили разделить зарегистрированный на последовательных этапах ксилогенеза климатический сигнал (Babushkina et al., 2021). В данном исследовании проводится сравнение взаимосвязей между параметрами анатомической структуры древесины и особенностей климатического отклика их индексированных хронологий для сосны обыкновенной, произрастающей в сходных условиях, но в расположенных на большом расстоянии регионах – Хакасии (данные Babushkina et al., 2021) и юге Бурятии.

Материалы и методы

Район исследования

Районами исследования являются межгорные долины Южной Сибири – подножие хребтов Селенгинского среднегорья Западного Забайкалья на юге Республики Бурятия и Хакасско-Минусинская котловина в Республике Хакасия (рис. 1). Расстояние между сравниваемыми регионами составляет около 1000 км в широт-

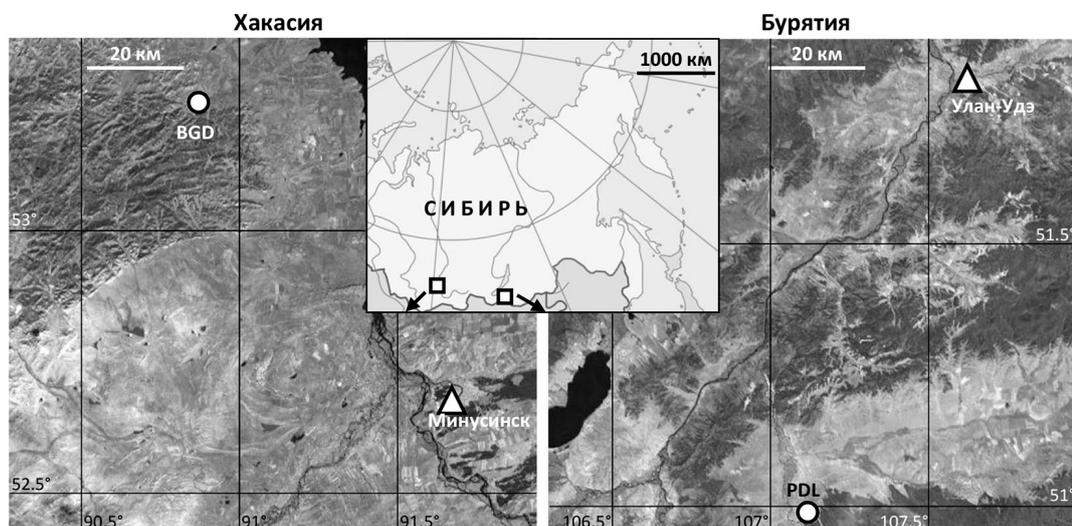


Рис. 1. Районы исследования: расположение участков сбора материала (круги) и метеостанций (треугольники) на спутниковой карте местности (Google ©). На карте-врезке показано расположение районов исследования (квадраты) в Сибири

Fig. 1. Study areas: location of sampling sites (circles) and climatic stations (triangles) on a satellite map of the area (Google ©). The inset map shows the locations of study areas (squares) within Siberia

ном направлении. На Селенгинском среднегорье хребты невысоки (до 1300–1800 м н.у.м.) и вытянуты в основном в северо-восточном или восточно-северо-восточном направлении (Demina et al., 2017; Belokopytova et al., 2018). Хакасско-Минусинскую котловину окружают более высокие горные системы – Кузнецкий Алатау (2200 м н.у.м.), Западный и Восточный Саян (до 3200–3500 м н.у.м.). Континентальный климат и горный рельеф обеспечили своеобразие растительного покрова в регионах. Котловины покрыты степями, окружающие хребты – светлохвойной тайгой, представленной преимущественно сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.).

Континентальность климата региона характеризуется большими суточными и годовыми амплитудами температур с суровой зимой и довольно жарким летом, небольшим количеством и неравномерным пространственно-временным распределением осадков (Алисов, 1956; Жуков, 1960; Фадеева, 1963). В данном исследовании использованы климатические ряды метеостанций «Улан-Удэ» (51.8°N 107.6°E) и «Шира» (54.5°N 89.9°E). Детальное количественное сравнение климатического режима этих двух регионов приведено в работе Demina et al. (2022). В целом, в Южной Бурятии наблюдается более выраженная континентальность климата за счет сильных зимних морозов, но и лето менее жаркое, чем в Хакасско-Минусинской котловине, поэтому весна наступает в среднем на неделю позже, а осень на несколько дней раньше. В то же время осадки в Южной Бурятии гораздо более сконцентрированы во второй половине вегетационного сезона, конец весны и начало лета весьма засушливы.

Получение и обработка данных годовичных колец

Сбор дендрохронологического материала (кernов, взятых с использованием воз-

растных буров) на юге Бурятии был произведен в окрестностях села Подлопатки (PDL; 51.0°N 107.1°E) на юго-востоке Тугнуйской котловины, в сосновом разнотравно-мертвопокровном лесу на песчаных почвах. В Хакасии образцы получены вблизи села Боград (BGD; 54.2°N 90.8°E) в предгорьях Батеневского кряжа Кузнецкого Алатау, в лиственнично-березово-сосновом злаково-разнотравном древостое на суглинистых серых лесных почвах. Оба участка расположены в пределах лесостепного экотона. Выбор модельных деревьев осуществлялся по общепринятой методике (Шиятов и др., 2000). Предпочтение отдавалось прямоствольным деревьям без признаков угнетения, механических повреждений и других неклиматических воздействий.

Керны были взяты, обработаны и датированы с использованием стандартных дендрохронологических методов (Stokes, Smiley, 1968; Cook, Kairiukstis, 1990). Измерения ширины годовичных колец (TRW) проведены на измерительной установке LINTAB 5 с применением специализированного пакета TSAP Win с точностью 0,01 мм (Rinn, 2003). Датировка (определение календарного года каждого кольца) подтверждалась кросс-корреляционным анализом в специализированной программе COFECOA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Далее проводилась процедура стандартизации (индексации) с помощью программы ARSTAN (Cook, Krusic, 2005), причем удаляемые длительные тренды описывали кубическими сглаживающими сплайнами с шириной окна 67 % длины каждого ряда измерений. После индексации делением измеренных рядов на возрастные кривые, индивидуальные ряды обобщили взвешенной средней для получения локальной стандартной хронологии.

Для анатомических измерений из полной выборки отобрали керны, характеризующиеся

камбиальным возрастом (количеством годовых колец от коры до сердцевины) не менее 100 лет, имеющие механическую целостность и высокие корреляции индивидуальных рядов TRW с локальной хронологией. В Бурятии было отобрано 5 образцов, в Хакасии – 7. Для получения из них поперечных срезов толщиной 12–14 мкм был использован ротационный микротом (Microm HM 340 E; Thermo Fisher Scientific, США). Срезы окрашивали 1%-ным раствором сафранина и астра блю, обезвоживали в растворах этанола с возрастающей концентрацией, промывали ксилолом и помещали на предметное стекло в канадский бальзам (Gärtner, Schweingruber, 2013).

Микрофотографии срезов получали при помощи цифровой камеры (ProgRes Gryphax Subra, Jenoptik GmbH, Германия), установленной на оптическом микроскопе с двухсоткратным увеличением (BX43, Olympus, Япония). При проведении анатомического анализа были измерены годовые кольца за период 1952–2014 гг. с помощью программы Lineyka (Силкин, 2010). Для пяти радиальных рядов клеток в каждом годовом кольце (Seo et al., 2014) измерили количество клеток в ряду (N), радиальный размер (D) и толщину клеточной стенки (CWT) (Ваганов и др., 1985; Larson,

1994). Для корректного усреднения данных отдельных радиальных рядов клеток в каждом кольце каждого индивидуального дерева по всем пяти рядам рассчитали среднее количество клеток и применили процедуру сжатия / растяжения рядов измерений D и CWT к этому N (Ваганов и др., 1985; Vaganov, 1990).

На следующем этапе для каждого кольца по полученным усредненным трахеидограммам были рассчитаны максимальное (Dmax) и среднее (Dmean) значения радиального размера клеток, максимальное (CWTmax) и среднее (CWTmean) значения толщины клеточной стенки (рис. 2). Для этих характеристик были сформированы «клеточные» хронологии для каждого индивидуального дерева. Помимо этого, рассчитали индивидуальные ряды TRW как суммы D для всех клеток и использовали их для перекрестного датирования рядов анатомических измерений с соответствующими измерениями на LINTAB. Следует отметить, что для обоих регионов в полной выборке деревьев наблюдалось малое количество выпавших колец (< 0,1 %), в том числе одно выпавшее кольцо в выбранном для анатомических измерений образце в Бурятии. В Хакасии анатомические измерения выпавших колец не содержали, самые узкие из из-

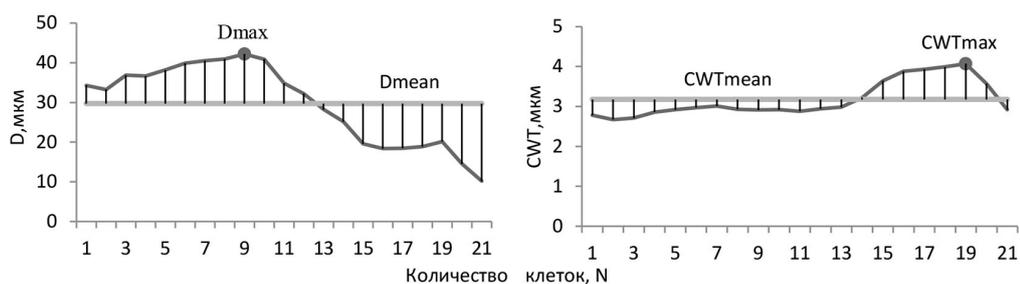


Рис. 2. Схема получения средних Dmean, CWTmean и максимальных Dmax, CWTmax значений радиального размера клетки D и толщины клеточной стенки CWT (на примере усредненных трахеидограмм D и CWT годового кольца 1960 г., дерево № 5 участка на юге Бурятии)

Fig. 2. Scheme for obtaining mean values Dmean and CWTmean and maximum values Dmax and CWTmax of radial cell size D and cell wall thickness CWT (averaged tracheidograms D and CWT of the tree ring in 1960, tree No. 5, sampling site in the South Buryatia, used as an example)

меренных колец в обоих регионах состояли из 2–3 клеток.

Для каждого индивидуального дерева индексы были рассчитаны делением измеренных значений на модельные ($D_{\text{mean_ind}} = D_{\text{mean_raw}} / D_{\text{mean}(N)}$) и т.д., где *ind* – значение индекса, *raw* – измеренное значение) аналогично удалению возрастных длительных трендов при индексировании TRW в дендрохронологии. На основе этих индивидуальных индексированных рядов усреднением получили обобщенные локальные индексированные хронологии рассматриваемых анатомических характеристик.

Для анализа взаимосвязей параметров годовичного кольца между собой и с климатическими факторами использовали корреляционный анализ (парные коэффициенты корреляции Пирсона), линейные и нелинейные регрессионные функции. Для зависимостей анатомических характеристик от количества клеток в кольце были использованы экспоненциальные функции $D = D_{\text{min}} + (D_{\text{as}} - D_{\text{min}}) \cdot (1 - e^{-a \cdot N})$; $CWT = CWT_{\text{min}} + (CWT_{\text{as}} - CWT_{\text{min}}) \cdot (1 - e^{-a \cdot N})$, где D_{min} , CWT_{min} – минимальные значения, соответствующие камбиальным клеткам; D_{as} , CWT_{as} – асимптотические, оптимальные значения, характерные для широких колец; *a* – числовой коэффициент, регулирующий нелинейность кривой. Для детализации климатического отклика были использованы скользящие ряды температуры и осадков с окном 21 день и шагом 1 день в течение вегетационного сезона. Такая ширина окна хорошо показала себя в дендроклиматическом анализе анатомических параметров древесины ранее (Babushkina et al., 2019b; Belokopytova et al., 2019).

Результаты

В данном исследовании зависимость TRW(N) близка к прямо пропорциональной,

так как свободный член в обоих регионах не превышает 0,14 мм (рис. 3; Babushkina et al., 2021), и не является статистически значимо на уровне $p < 0,05$ отличающимся от нуля во всех полученных моделях. Близкий к единице для всех деревьев коэффициент детерминации этой линейной регрессии (0,93–0,99) указывает на высокую достоверность полученных моделей и близость наблюдаемой взаимосвязи к строго линейной функциональной зависимости. Числовой коэффициент при *N*, являющийся оценкой среднего значения радиального размера клеток, варьирует для отдельных деревьев в Южной Бурятии в пределах 31,1–33,8 мкм, в Хакасии диапазон составляет 30,3–35,6 мкм; для локальной выборки значения также близки: 32,6 и 32,2 мкм соответственно.

Зависимости размера клеток и толщины клеточной стенки от количества клеток *N* в кольце хорошо описываются отрицательной экспоненциальной функцией (рис. 4). Быстрое увеличение *D* и утолщение CWT с ростом числа клеток, наблюдающееся в узких кольцах, постепенно переходит в стабильные значения в широких кольцах, т.е. при больших *N*. После подбора числовых параметров моделей (таблица) коэффициенты корреляции модельных значений с фактическими измерениями составляют от 0,33 до 0,91. В Бурятии по сравнению с Хакасией (Babushkina et al., 2021) относительно низкие корреляции наблюдаются чаще; тем не менее они все значимы на уровне $p < 0,05$. В среднем по локальной выборке оптимальные размеры клеток в Бурятии меньше (в Бурятии 42,8 и 29,7 мкм для максимального и среднего размера клеток соответственно при 43,7 и 32,0 мкм в Хакасии); оптимальные значения для CWT, напротив, выше (5,3 и 3,1 мкм для CWT_{max} и CWT_{mean} соответственно при 4,6 и 3,0 мкм в Хакасии).

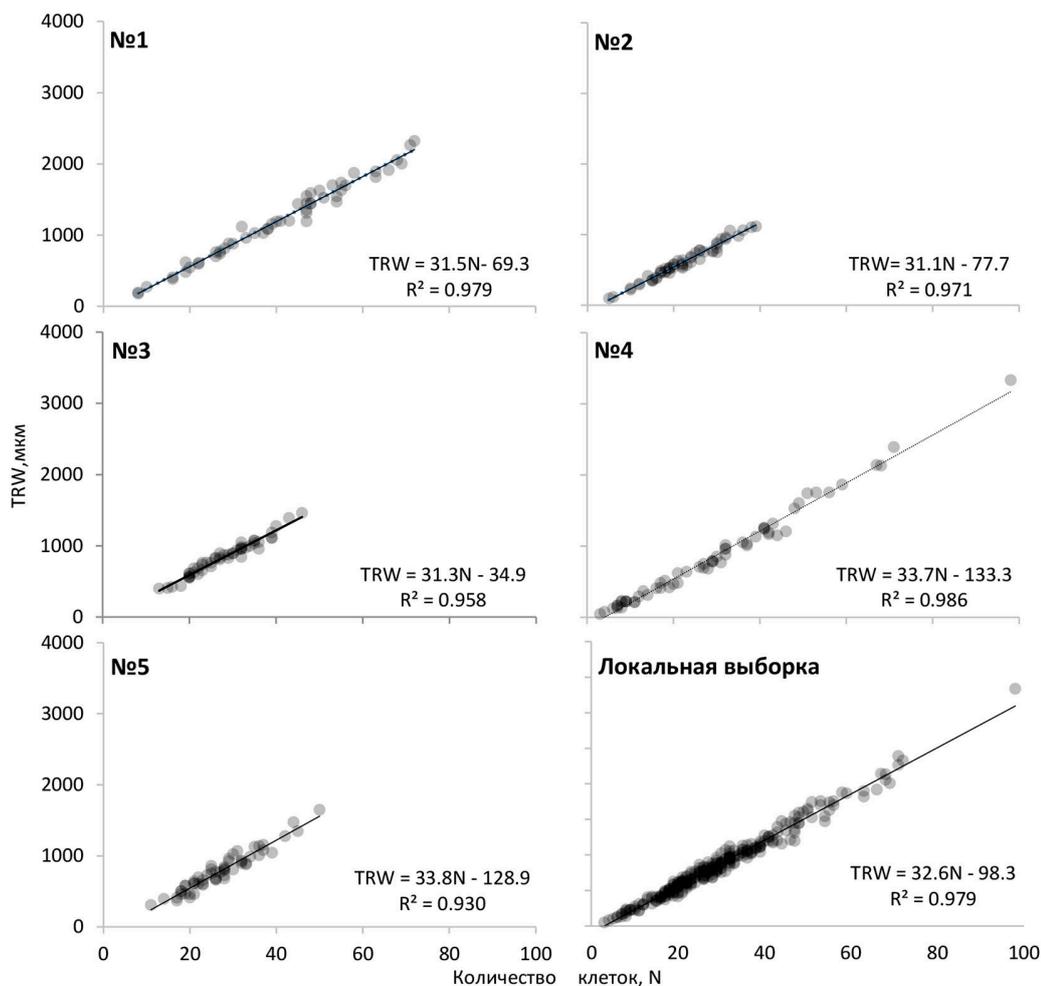


Рис. 3. Зависимость ширины годичного кольца TRW от количества клеток N для индивидуальных деревьев и всей локальной выборки на примере участка на юге Бурятии

Fig. 3. Dependence of the tree-ring width TRW on the number of cells N for individual trees and the entire local sample, with the sampling site in the South Buryatia used as an example

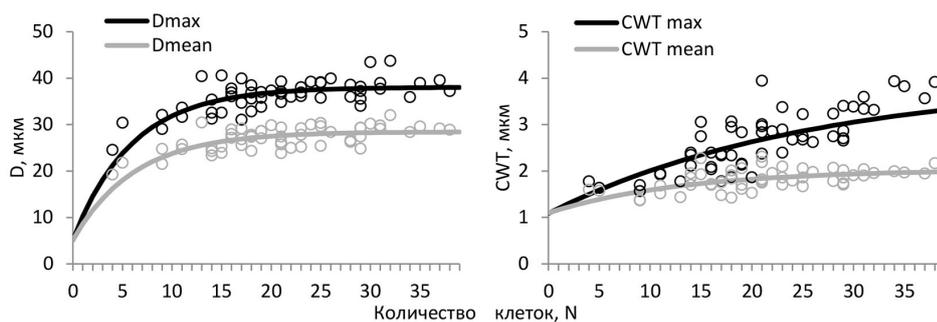


Рис. 4. Зависимость средних и максимальных значений клеточных характеристик D и CWT от количества клеток N на примере дерева № 2, участок на юге Бурятии

Fig. 4. Dependence of the mean and maximum values of cell characteristics D and CWT on the number of cells N, with tree No. 2, sampling site in the South Buryatia, used as an example

Таблица. Числовые параметры уравнений зависимостей анатомических характеристик от количества клеток: D_{\min} , CWT_{\min} – минимальные значения при $N=0$; D_{as} , CWT_{as} – асимптотические, оптимальные значения; a – числовой коэффициент, регулирующий нелинейность кривой. R – коэффициент корреляции моделированного ряда и фактических измерений; R^2 – коэффициент детерминации модели. Для участка в Хакасии приведены данные из Babushkina et al. (2021)

Table. Numerical parameters of the equations of cell number dependences of anatomical characteristics: D_{\min} , CWT_{\min} , minimum values at $N=0$; D_{as} , CWT_{as} , asymptotic, optimal values; a , numerical coefficient regulating curve nonlinearity. R , correlation coefficient between model series and actual measurements; R^2 , determination coefficient of model. For the site in Khakassia, presented data are from Babushkina et al. (2021)

Дерево	Dmax					Dmean				
	D_{\min} , МКМ	D_{as} , МКМ	a	R	R^2	D_{\min} , МКМ	D_{as} , МКМ	a	R	R^2
Юг Бурятии										
№ 1	5,2	42,15	0,14	0,61	0,37	5,2	29,88	0,17	0,51	0,26
№ 2		38,04	0,17	0,70	0,49		28,45	0,16	0,68	0,46
№ 3		49,42	0,14	0,35	0,12		30,62	0,16	0,33	0,11
№ 4		41,76	0,16	0,66	0,44		29,23	0,16	0,69	0,48
№ 5		42,86	0,13	0,35	0,12		30,44	0,11	0,39	0,15
Хакасия										
№ 1	7	43	0,17	0,59	0,35	7	32	0,12	0,54	0,29
№ 2		43	0,14	0,48	0,23		32	0,12	0,53	0,28
№ 3		45	0,10	0,61	0,37		33	0,10	0,59	0,35
№ 4		41	0,25	0,69	0,48		31	0,22	0,66	0,44
№ 5		45	0,13	0,78	0,61		34	0,13	0,73	0,53
№ 6		43	0,11	0,74	0,55		30	0,11	0,74	0,55
№ 7		46	0,14	0,71	0,50		32	0,15	0,71	0,50
	CWTmax					CWTmean				
	CWT_{\min} , МКМ	CWT_{as} , МКМ	a	R	R^2	CWT_{\min} , МКМ	CWT_{as} , МКМ	a	R	R^2
Юг Бурятии										
№ 1	1,1	6,3	0,04	0,85	0,72	1,1	3,2	0,06	0,68	0,46
№ 2		4,0	0,04	0,79	0,62		2,0	0,07	0,53	0,28
№ 3		5,4	0,04	0,78	0,61		3,3	0,04	0,67	0,45
№ 4		6,0	0,04	0,91	0,83		3,6	0,08	0,84	0,71
№ 5		4,6	0,09	0,50	0,25		3,3	0,11	0,47	0,22
Хакасия										
№ 1	1,5	4,0	0,07	0,72	0,52	1,5	2,6	0,12	0,54	0,29
№ 2		4,4	0,05	0,81	0,66		3,0	0,04	0,76	0,58
№ 3		4,5	0,06	0,79	0,62		3,0	0,06	0,63	0,40
№ 4		4,5	0,06	0,69	0,48		3,5	0,06	0,41	0,17
№ 5		4,7	0,06	0,69	0,48		3,0	0,05	0,58	0,34
№ 6		5,7	0,05	0,85	0,72		3,3	0,06	0,74	0,55
№ 7		4,3	0,05	0,86	0,74		2,8	0,04	0,80	0,64

Индексирование анатомических параметров позволило получить их локальные хронологии (рис. 5), статистически независимые от продукции клеток и ширины годичных колец. Дендроклиматический анализ полученного набора индексированных хронологий проводился для мая–сентября (вегетационный сезон) за общий период 1959–2008 гг. (рис. 6). Согласно полученным данным, принципиальная картина климатического отклика сходна для обоих засушливых регионов, основные различия отмечаются в интенсивности и в сдвиге сезонности отклика на более позд-

ние даты в исследуемых сосновых лесах юга Бурятии. TRW положительно коррелирует с осадками с конца мая до конца июля, т.е. более позднее начало и большая длительность, чем в Хакасии, где отклик зарегистрирован в течение мая и первой половины июня. Отрицательный отклик на температуру в отличие от лесостепи Хакасии в Бурятии не выражен, но положительная корреляция с температурой отмечена в августе. Для исходных измерений показателей диаметра клетки Dmax и Dmean климатический отклик сходен с TRW, но после индексирования картина выглядит иначе.

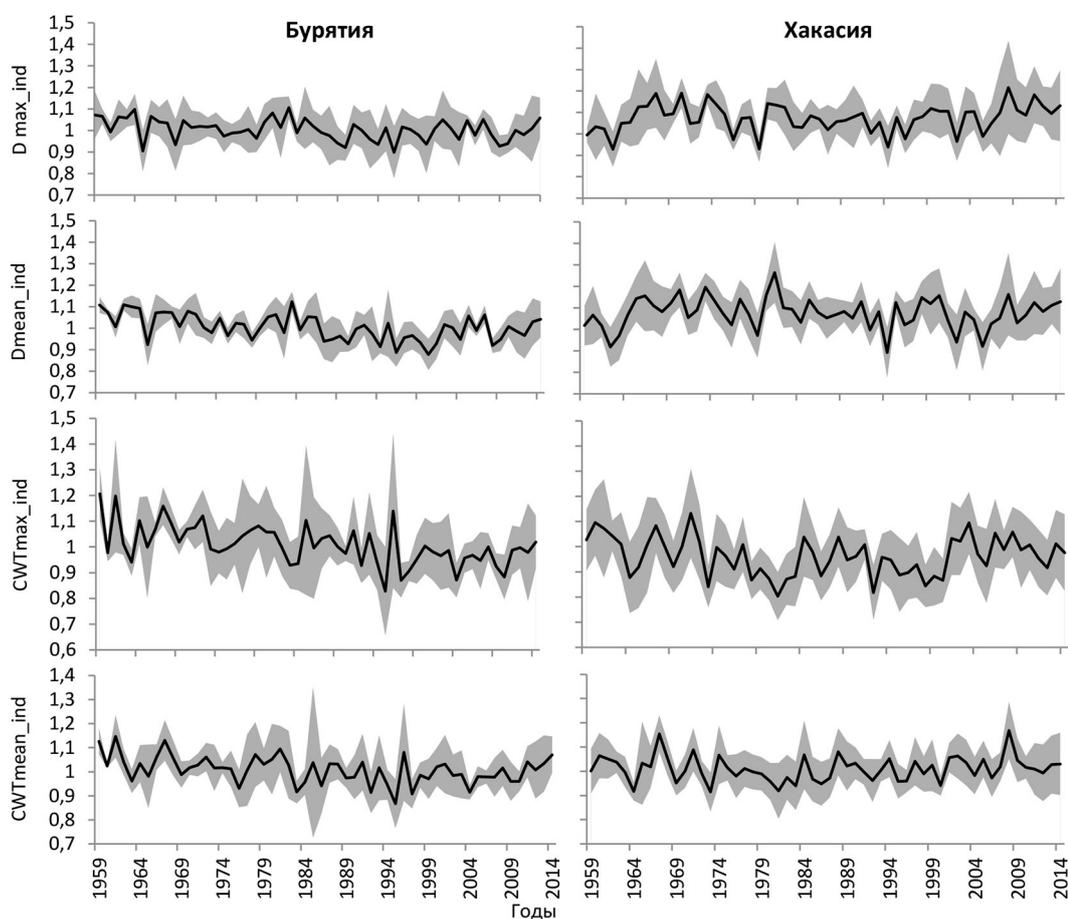


Рис. 5. Локальные индексированные хронологии анатомических характеристик за общий период (1959–2014 гг.). Области показаны стандартные отклонения для каждого календарного года

Fig. 5. Local indexed chronologies of anatomical characteristics for their common period (1959–2014). Shaded areas represent standard deviations for each calendar year

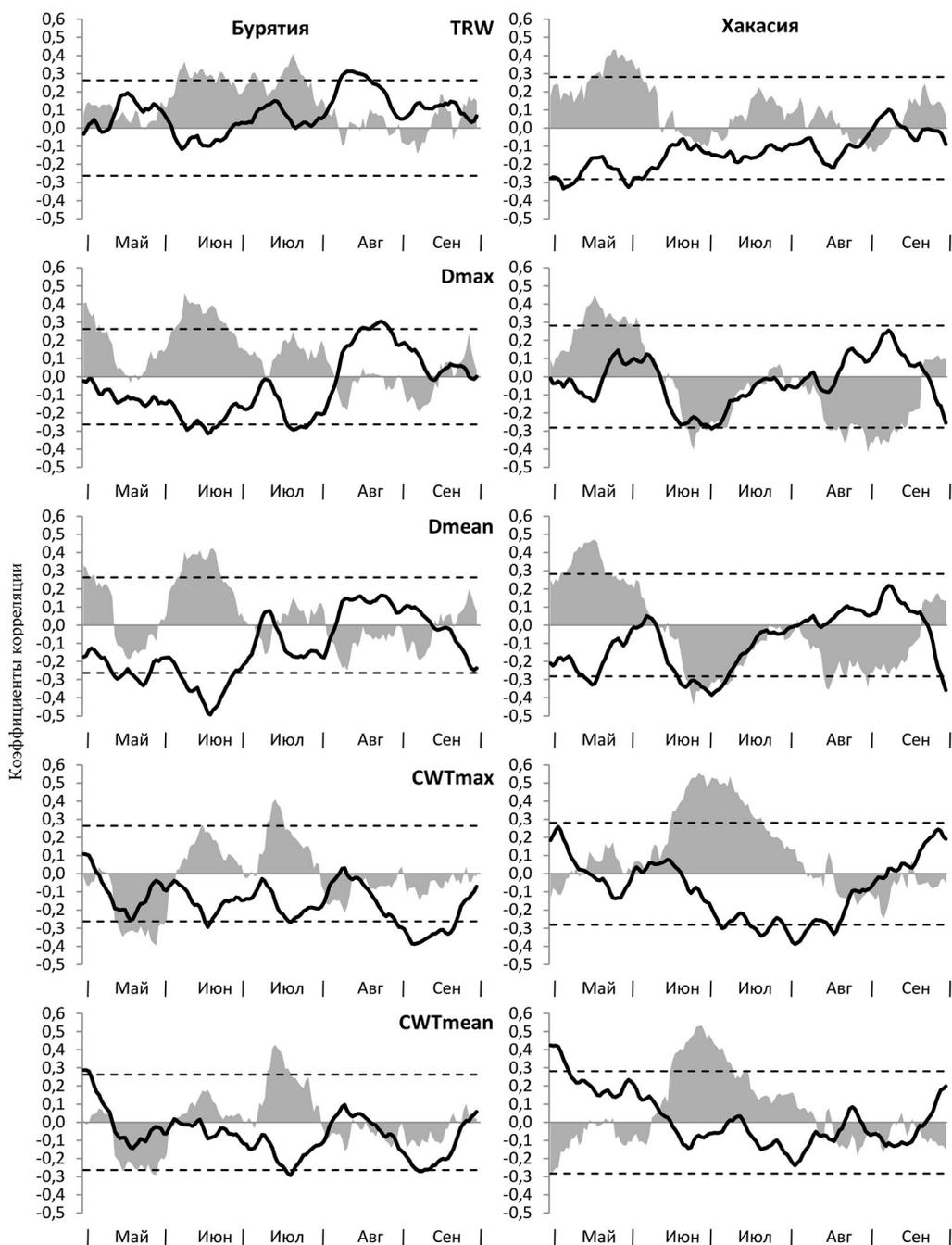


Рис. 6. Климатический отклик характеристик годичного кольца: корреляции индексированных древесно-кольцевых хронологий со скользящими рядами температуры (линии) и осадков (области), рассчитанными из суточных данных с окном 21 день и шагом 1 день за 1959–2008 гг. Горизонтальными штриховыми линиями показан уровень значимости коэффициентов корреляции $p=0,05$

Fig. 6. Climatic response of tree-ring characteristics: correlations of indexed tree-ring chronologies with moving series of temperature (lines) and precipitation (areas) calculated from daily data with 21-day window and 1-day step for 1959–2008. The horizontal dashed lines represent the significance level $p=0.05$ of the correlation coefficients

Формирование более крупных клеток в Бурятии наблюдается в первую очередь при более влажных и прохладных условиях в середине июня (реакция также сдвинута почти на месяц позднее, чем в условиях Хакасии). Показатели толщины клеточной стенки в Бурятии зависят от количества осадков середины июля, а отрицательная зависимость от температуры воздуха конца вегетационного сезона, сильнее выраженная у CWT_{max} , максимальна в начале сентября (отставание от Хакасии на 2–3 недели). В обеих хронологиях CWT_{mean} и CWT_{max} такая сезонность отклика более выражена после индексирования.

Обсуждение

Ширину годичного кольца, очевидно, можно аналитически определить как сумму радиальных размеров клеток в радиальном ряду. Однако изменчивость размера трахеид жестко ограничена необходимостью баланса между проводимостью и устойчивостью трахеид к дисфункции (Fromm, 2013; Fonti, Babushkina, 2016; ср. также вариацию радиального прироста и анатомических характеристик в Babushkina et al., 2021). Мы полагаем, что, несмотря на существенные различия между регионами как в количестве выпадающих осадков, так и в температурах вегетационного сезона (Demina et al., 2022), расположение исследуемых участков на семиаридной лесостепной границе произрастания сосны является индикатором сходной степени дефицита увлажнения и, соответственно, требованиями к гидравлической архитектуре взрослых сосен. С учетом крайней чувствительности водопроводящей функции к изменению размеров люмена (Tyree, Ewers, 1991) это объясняет узость наблюдаемого в данном исследовании диапазона колебаний числовых коэффициентов функций $TRW(N)$ при сравнении индивидуальных деревьев и сход-

ство этого диапазона для рассматриваемых регионов. В то же время количество клеток в годичном кольце варьирует в широких пределах – от нуля (выпавшие кольца) или 2–3 клеток до сотни и более трахеид в особенно благоприятные годы (см. рис. 3). Сочетание такой высокой изменчивости продукции клеток с функциональными ограничениями их размера обеспечивает практически прямую пропорциональность $TRW(N)$, которая для отдельных дендрохронологических полигонов была зарегистрирована уже несколько десятилетий назад (Ваганов и др., 1985).

Рассчитанные в данном исследовании аналитические оценки зависимостей параметров годичного кольца сосны с продукцией клеток на юге Бурятии и в Хакасии сравнимы по статистическим характеристикам экспоненциальной взаимосвязи и числовым значениям коэффициентов. Эта общность демонстрирует стабильность выявленных внутренних взаимосвязей как минимум в широких географических масштабах, поскольку условия места произрастания (нижняя граница леса) и видовая принадлежность в сравниваемых случаях совпадают. Нелинейность функций $D(N)$ и $CWT(N)$ обеспечивается компромиссом между синхронным подавлением всех стадий продукции и дифференцировки трахеид при экстремальном стрессе в узких кольцах и оптимумом анатомической структуры, достигаемым при благоприятных климатических условиях в широких кольцах. Различия между регионами в оптимальных значениях D и CWT хоть и невелики, но стабильны (наблюдаются для всех деревьев выборок). Предположительно, меньший размер клеток и более толстые клеточные стенки являются приспособлением к вероятности более интенсивных засух в Южной Бурятии, где распределение осадков по вегетационному сезону более неравномерно и в мае-июне

выпадает гораздо меньше осадков по сравнению с Хакасией (Demina et al., 2022). Подобные различия между местообитаниями зарегистрированы и при сравнении анатомических характеристик в условиях локального градиента увлажнения (Fonti, Babushkina, 2016). Однако вследствие большой дистанции между регионами и естественной природы исследуемых древостоев эти различия могут быть также обусловлены генетически, различием в экотипах (ср., например: Matisons et al., 2019).

Направление дендроклиматических корреляций соответствует характеру климатических условий. В течение вегетационного сезона комбинация косвенного воздействия температуры как иссушающего фактора и прямого воздействия осадков как источника увлажнения регулируют доступность почвенной влаги и, соответственно, интенсивность транспирации и фотосинтеза, поэтому комбинация положительных корреляций с осадками и отрицательных с температурой характерны для семиаридных лесных экосистем, в том числе континентальной Азии (Liu et al., 2013; Shestakova et al., 2016; Gradel et al., 2017). Менее жаркое лето и концентрация недостатка увлажнения в течение более прохладного начала сезона, похоже, ослабляет реакцию сосны на температуру в Южной Бурятии по сравнению с Хакасией (ср. Belokopytova et al., 2018; Demina et al., 2022), по крайней мере для радиального прироста. Различия между хронологиями индексированных анатомических параметров и радиального прироста по сезонности и интенсивности наблюдаемых корреляций с климатическими факторами подтверждают эффективность использованного подхода для разделения климатического отклика. Между хронологиями значений D и CWT эти различия также существенны, и сдвиги в сезонности отклика в целом со-

ответствуют последовательности формирования ранней/поздней древесины и этапов ксилогенеза (Larson, 1994). Например, в Бурятии, судя по сезонности основных максимумов дендроклиматических корреляций для максимальных значений D и CWT (рис. 6; ср. Arzac et al., 2018), растяжение самых крупных клеток ранней древесины приходится на первые три недели июня, а отложение клеточной стенки клеток поздней древесины происходит в течение первых трех недель сентября. Отклик хронологий CWT на условия июля может быть связан с максимумом температур в этой части сезона, а также с завершением роста побегов сосны в конце июня – начале июля (Andersson Gull et al., 2018) и, соответственно, перенаправлением большей доли ресурсов на вторичный рост с этого момента. Для средних значений анатомических характеристик, интегрирующих записанный во всех трахеидах кольца климатический сигнал, сезонность корреляций несколько менее очевидна, но в целом сходна с соответствующими максимальными значениями.

По сравнению с Хакасией полученный для Южной Бурятии климатический отклик параметров годовых колец менее выражен, что может быть результатом большего расстояния между исследуемым древостоем и метеостанцией. Тем не менее очень важным наблюдением является то, что для хронологий практически всех параметров древесины сосны из Бурятии наблюдается внутрисезонный сдвиг основного отклика на более поздние сроки по сравнению с Хакасией в диапазоне от одной до четырех недель. Наличие сдвига для всех стадий ксилогенеза и зон кольца согласуется с выявленными Rossi et al. (2013) существенными взаимосвязями сроков начала и окончания ксилогенеза и его отдельных этапов в течение сезона. Известно, что при чередовании теплого вегетационного

сезона и холодного сезона покоя основным триггером начала камбиальной активности хвойных деревьев является достижение определенной пороговой температуры, находящейся в диапазоне 5–8° в зависимости от вида и климатического типа (Rossi et al., 2007, 2008). Однако различие в весенней динамике температуры между регионами могло бы объяснить задержку в несколько дней, максимум неделю. Поэтому в сочетании с малоснежными зимами континентального климата и наличием в Южной Бурятии максимума засушливости в мае–июне более выраженные фенологические сдвиги предположительно указывают на наличие в этом регионе дополнительного фактора регуляции начала ксилогенеза – доступности увлажнения (ср. Ren et al., 2015, 2018; Ziaco et al., 2018).

В конце сезона сдвиги сезонности отклика позволяют выдвинуть новые предположения и об особенностях внешней регуляции ксилогенеза сосны в Хакасии: максимум воздействия температуры на отложение клеточной стенки трахеид поздней древесины в этом регионе наблюдается практически на месяц раньше, чем в Бурятии, хотя осенние холода наступают позже. Это означает, что завершение вторичного роста сосны в Хакасии регулируется не температурой, так как в Бурятии ксилогенез успешно продолжается в более холодных условиях сентября. Возможная регуляция фенологии фотопериодом (Way, Montgomery, 2015; Singh et al., 2017) скорее привела бы к синхронизации окончания ксилогенеза между регионами. Поэтому наиболее вероятными предположениями

здесь являются обусловленные климатом фенологические различия (ср. зависимости фенологии первичного роста сосны от долготы и широты, Oleksyn et al., 1998; Andersson Gull et al., 2018) и внутренние факторы, обуславливающие синхронизацию сроков начала и окончания ксилогенеза (Rossi et al., 2013).

Заключение

Описанные линейные зависимости ширины годичного кольца и экспоненциальные морфометрические параметры трахеид сосны обыкновенной от их продукции имеют стабильный характер на больших географических расстояниях, что поддерживает применимость предложенного метода индексирования анатомических хронологий для дендроклиматических исследований. Дополнительным бонусом от разделения климатического отклика оказалась возможность оценки внутрисезонных интервалов для последовательных этапов ксилогенеза. При этом сопоставление сходных по ведущему лимитирующему фактору местообитаний в регионах с различающимся климатом позволило выдвинуть предположения о механизмах регулирования вторичного роста сосны. Сравнение полученных из дендроклиматического анализа косвенных фенологических оценок с прямыми наблюдениями кинетики сезонного роста годичных колец в будущем может привести к получению длительных прокси и прогнозов не только для климатических факторов, но и для фенологических сдвигов как последствий изменения климата.

Список литературы / References

- Алисов Б. П. (1956) *Климат СССР*. М., МГУ, 128 с. [Alisov B. P. (1986) *Climate of the USSR*. Moscow, Moscow State University, 128 p. (in Russian)]
- Ваганов Е. А., Шашкин А. В., Свидерская И. В., Высоцкая Л. Г. (1985) *Гистометрический анализ роста древесных растений*. Новосибирск, Наука, 100 с. [Vaganov E. A., Shashkin A. V.,

Sviderskaya I. V., Vysotskaya L. G. (1985) *Histometric analysis of the growth of woody plants*. Novosibirsk, Nauka, 100 p. (in Russian)]

Жуков В. М. (1960) *Климат Бурятской АССР*. Улан-Удэ, Бурятское книжное издательство, 188 с. [Zhukov V. M. (1960) *Climate of the Buryat ASSR*. Ulan-Ude, Buryat Book Publishing House, 188 p. (in Russian)]

Силкин П. П. (2010) *Методы многопараметрического анализа структуры годичных колец хвойных*. Красноярск, СФУ, 335 с. [Silkin P. P. (2010) *Methods of multiparameter analysis of conifers tree-ring structure*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 335 p. (in Russian)]

Фадеева Н. В. (1963) *Селенгинское среднегорье (природные условия и районирование)*. Улан-Удэ, Бурятское книжное издательство, 169 с. [Fadeeva N. V. (1963) *Selenga Highlands (natural conditions and zoning)*. Ulan-Ude, Buryat Book Publishing House, 169 p. (in Russian)]

Чебакова Н. М., Парфенова Е. И. (2006) Прогноз продвижения границ леса при изменении климата к концу 20 века в Средней Сибири. *Вычислительные технологии*, 11(3): 77–86 [Tshebakova M. N., Parfenova E. I. (2006) Predicting forest shifting in a changed climate by the end of the 20th century in Middle Siberia. *Computing Technology* [Vychislitelnye tekhnologii], 11(3): 77–86 (in Russian)]

Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурызбаев М. М., Хантемиров Р. М. (2000) *Основы дендрохронологии. Ч. I. Сбор и получение древесно-кольцевой информации*. Красноярск, КрасГУ, 80 с. [Shiyatov S. G., Vaganov E. A., Kirdyanov A. V., Kruglov V. B., Mazepa V. S., Naurzbaev M. M., Khantemirov R. M. (2000) *Fundamentals of dendrochronology. Part I. Collecting and acquiring tree-ring information*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University, 80 p. (in Russian)]

Allen C. D., Breshears D. D., McDowell N. G. (2015) On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8): 129

Andersson Gull B., Persson T., Fedorkov A., Mullin T. J. (2018) Longitudinal differences in Scots pine shoot elongation. *Silva Fennica*, 52(5): 10040

Arzac A., Babushkina E. A., Fonti P., Slobodchikova V., Sviderskaya I. V., Vaganov E. A. (2018) Evidences of wider latewood in *Pinus sylvestris* from a forest-steppe of Southern Siberia. *Dendrochronologia*, 49: 1–8

Babushkina E. A., Zhirnova D. F., Belokopytova L. V., Tychkov I. I., Vaganov E. A., Krutovsky K. V. (2019a) Response of four tree species to changing climate in a moisture-limited area of South Siberia. *Forests*, 10(11): 999

Babushkina E. A., Belokopytova L. V., Zhirnova D. F., Vaganov E. A. (2019b) Siberian spruce tree ring anatomy: imprint of development processes and their high-temporal environmental regulation. *Dendrochronologia*, 53: 114–124

Babushkina E. A., Dergunov D. R., Belokopytova L. V., Zhirnova D. F., Upadhyay K. K., Tripathi S. K., Zharkov M. S., Vaganov E. A. (2021) Non-linear response to cell number revealed and eliminated from long-term tracheid measurements of Scots pine in Southern Siberia. *Frontiers in Plant Science*, 12: 719796

Belokopytova L., Zhirnova D., Kostyakova T., Babushkina E. (2018) Dynamics of moisture regime and its reconstruction from a tree-ring width chronology of *Pinus sylvestris* in the downstream basin of the Selenga River, Russia. *Journal of Arid Land*, 10(6): 877–891

- Belokopytova L. V., Babushkina E. A., Zhirnova D. F., Panyushkina I. P., Vaganov E. A. (2019) Pine and larch tracheids capture seasonal variations of climatic signal at moisture-limited sites. *Trees – Structure and Function*, 33(1): 227–242
- Borchert R., Rivera G., Hagnauer W. (2002) Modification of vegetative phenology in a tropical semi-deciduous forest by abnormal drought and rain. *Biotropica*, 34(1): 27–39
- Büntgen U. (2019) Re-thinking the boundaries of dendrochronology. *Dendrochronologia*, 53: 1–4
- Castagneri D., Fonti P., von Arx G., Carrer M. (2017) How does climate influence xylem morphogenesis over the growing season? Insights from long-term intra-ring anatomy in *Picea abies*. *Annals of Botany*, 119(6): 1011–1020
- Churakova O. V., Fonti M. V., Siegwolf R. T.W., Saurer M., Myglan V. S. (2020) Impact of recent climate change on water-use efficiency strategies of *Larix sibirica* in the Altai-Sayan mountain range. *Forests*, 11(10): 1103
- Cleland E. E., Chuine I., Menzel A., Mooney H. A., Schwartz M. D. (2007) Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(7): 357–365
- Cook E. R., Kairiukstis L. A. (1990) *Methods of dendrochronology: applications in environmental sciences*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 394 p.
- Cook E. R., Krusic P. J. (2005) *Program ARSTAN: a tree-ring standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics*. Palisades, Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University. User reference http://www.ldeo.columbia.edu/sites/default/files/res/fac/trl/downloads/software/ARSTAN_XP.zip [accessed 2 April 2018]
- Davi N., Jacoby G., Fang K., Li J., D'Arrigo R., Baatarbileg N., Robinson D. (2010) Reconstructing drought variability for Mongolia based on a large-scale tree ring network: 1520–1993. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(22): D 22103
- Demina A. V., Belokopytova L. V., Andreev S. G., Kostyakova T. V., Babushkina E. A. (2017) Radial increment dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as an indicator of hydrothermal regime of the Western Transbaikalia forest steppe. *Contemporary Problems of Ecology*, 10(5): 476–487
- Demina A. V., Belokopytova L. V., Zhirnova D. F., Mehrotra N., Shah S. K., Babushkina E. A., Vaganov E. A. (2022) Degree of connectivity in reconstructed precipitation dynamics and extremes for semiarid regions across South Siberia. *Dendrochronologia*, 71: 125903
- Dulamsuren C., Hauck M., Bader M., Osokhjargal D., Oyungerel S., Nyambayar S., Runge M., Leuschner C. (2009) Water relations and photosynthetic performance in *Larix sibirica* growing in the forest-steppe ecotone of northern Mongolia. *Tree Physiology*, 29(1): 99–110
- Dulamsuren C., Khishigjargal M., Leuschner C., Hauck M. (2014) Response of tree-ring width to climate warming and selective logging in larch forests of the Mongolian Altai. *Journal of Plant Ecology*, 7(1): 24–38
- Esper J., Krusic P. J., Ljungqvist F. C., Luterbacher J., Carrer M., Cook E., Davi N. K., Hartl-Meier C., Kirilyanov A., Konter O., Myglan V., Timonen M., Treyde K., Trouet V., Villalba R., Yang B., Büntgen U. (2016) Ranking of tree-ring based temperature reconstructions of the past millennium. *Quaternary Science Reviews*, 145: 134–151
- Fang K., Gou X., Chen F., Zhang F., Li Y., Peng J. (2010) Comparisons of drought variability between central High Asia and monsoonal Asia: Inferred from tree rings. *Frontiers of Earth Science in China*, 4(3): 277–288

- Fonti P., von Arx G., García-González I., Eilmann B., Sass-Klaassen U., Gärtner H., Eckstein D. (2010) Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist*, 185(1): 42–53
- Fonti P., Babushkina E. A. (2016) Tracheid anatomical responses to climate in a forest-steppe in Southern Siberia. *Dendrochronologia*, 39: 32–41
- Fromm J. (2013) *Cellular aspects of wood formation. Plant Cell Monographs, Volume 20*. Berlin, Heidelberg, Springer, 260 p.
- Gärtner H., Schweingruber F.H. (2013) *Microscopic preparation techniques for plant stem analysis*. Eifelweg, Verlag Dr. Kessel, 78 p.
- Gordon C., Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood R.A. (2000) The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16(2–3): 147–168
- Gradel A., Haensch C., Ganbaatar B., Dovdondemberel B., Nadaldorj O., Günther B. (2017) Response of white birch (*Betula platyphylla* Sukaczew) to temperature and precipitation in the mountain forest steppe and taiga of northern Mongolia. *Dendrochronologia*, 41: 24–33
- Grissino-Mayer H.D. (2001) Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2): 205–221
- Groisman P.Y., Gutman G. (eds.) (2012) *Regional environmental changes in Siberia and their global consequences*. Dordrecht, Springer, 360 p.
- Holmes R. L. (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 68–78
- Larson P.R. (1994) *The vascular cambium. Development and structure*. Berlin, Springer, 725 p.
- Liu H., Park Williams A., Allen C.D., Guo D., Wu X., Anenkhonov O. A., Liang E., Sandanov D. V., Yin Y., Qi Z., Badmaeva N.K. (2013) Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, 19(8): 2500–2510
- Ljungqvist F.C., Piermattei A., Seim A., Krusic P.J., Büntgen U., He M., Kirilyanov A.V., Luterbacher J., Schneider L., Seftigen K., Stahle D.W., Villalba R., Yang B., Esper J. (2020) Ranking of tree-ring based hydroclimate reconstructions of the past millennium. *Quaternary Science Reviews*, 230: 106074
- Matisons R., Krišāns O., Kārklīņa A., Adamovičs A., Jansons Ā., Gärtner H. (2019) Plasticity and climatic sensitivity of wood anatomy contribute to performance of eastern Baltic provenances of Scots pine. *Forest Ecology and Management*, 452: 117568
- Menzel A. (2002) Phenology: its importance to the global change community. *Climatic Change*, 54(4): 379–385
- Misson L., Degueldre D., Collin C., Rodriguez R., Rocheteau A., Ourcival J.M., Rambal S. (2011) Phenological responses to extreme droughts in a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 17(2): 1036–1048
- Oleksyn J., Tjoelker M.G., Reich P.B. (1998) Adaptation to changing environment in Scots pine populations across a latitudinal gradient. *Silva Fennica*, 32(2): 129–140
- Panyushkina I.P., Hughes M.K., Vanganov E.A., Munro M.A.R. (2003) Summer temperature in northeastern Siberia since 1642 reconstructed from tracheid dimensions and cell numbers of *Larix cajanderi*. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(10): 1905–1914

- Ren P., Rossi S., Camarero J.J., Ellison A.M., Liang E., Peñuelas J. (2018) Critical temperature and precipitation thresholds for the onset of xylogenesis of *Juniperus przewalskii* in a semi-arid area of the north-eastern Tibetan Plateau. *Annals of Botany*, 121(4): 617–624
- Ren P., Rossi S., Gricar J., Liang E., Cufar K. (2015) Is precipitation a trigger for the onset of xylogenesis in *Juniperus przewalskii* on the north-eastern Tibetan Plateau? *Annals of Botany*, 115(4): 629–639
- Rich P.M., Breshears D.D., White A.B. (2008) Phenology of mixed woody–herbaceous ecosystems following extreme events: net and differential responses. *Ecology*, 89(2): 342–352
- Riechelmann D.F.C., Gouw-Bouman M.T.I.J. (2019) A review of climate reconstructions from terrestrial climate archives covering the first millennium AD in northwestern Europe. *Quaternary Research*, 91(1): 111–131
- Rinn F. (2003) *TSAP-Win: time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications: User reference*. RINNTECH, Heidelberg, 110 p.
- Rivas-Martínez S., Rivas-Saenz S., Penas A. (2002) Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, 1(1): 1–634
- Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T., Carraro V. (2007) Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152(1): 1–12
- Rossi S., Deslauriers A., Gričar J., Seo J.W., Rathgeber C.B.K., Anfodillo T., Morin H., Levanić T., Oven P., Jalkanen R. (2008) Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography*, 17(6): 696–707
- Rossi S., Anfodillo T., Čufar K., Cuny H.E., Deslauriers A., Fonti P., Frank D., Gričar J., Gruber A., King G.M., Krause C., Morin H., Oberhuber W., Prislan P., Rathgeber C.B.K. (2013) A meta-analysis of cambium phenology and growth: linear and non-linear patterns in conifers of the northern hemisphere. *Annals of Botany*, 112(9): 1911–1920
- Seo J.W., Smiljanić M., Wilmking M. (2014) Optimizing cell-anatomical chronologies of Scots pine by stepwise increasing the number of radial tracheid rows included – Case study based on three Scandinavian sites. *Dendrochronologia*, 32(3): 205–209
- Shestakova T.A., Gutiérrez E., Kirilyanov A.V., Camarero J.J., Génova M., Knorre A.A., Linares J.C., de Dios V.R., Sánchez-Salguero R., Voltas J. (2016) Forests synchronize their growth in contrasting Eurasian regions in response to climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(3): 662–667
- Singh R.K., Svystun T., AlDahmash B., Jönsson A.M., Bhalerao R.P. (2017) Photoperiod- and temperature-mediated control of phenology in trees – a molecular perspective. *New Phytologist*, 213(2): 511–524
- Stokes M.A., Smiley T.L. (1968) *An introduction to tree-ring dating*. Chicago, University of Chicago Press, 73 p.
- Swidrak I., Schuster R., Oberhuber W. (2013) Comparing growth phenology of co-occurring deciduous and evergreen conifers exposed to drought. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 208(10–12): 609–617
- Tabakova M.A., Arzac A., Martínez E., Kirilyanov A.V. (2020) Climatic factors controlling *Pinus sylvestris* radial growth along a transect of increasing continentality in southern Siberia. *Dendrochronologia*, 62: 125709

Tyree M. T., Ewers F. W. (1991) The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytologist*, 119(3): 345–360

Vaganov E. A. (1990) The tracheidogram method in tree-ring analysis and its application. *Methods of dendrochronology. Application in environmental sciences*. Cook E.R., Kairiukstis L.A. (eds.) Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 63–75

Wang H., Shao X.M., Fang X.Q., Yin Z.Y., Chen L., Zhao D.S., Wu S.H. (2011) Responses of *Pinus koraiensis* tree ring cell scale parameters to climate elements in the Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(10): 2643–2652

Way D. A., Montgomery R. A. (2015) Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world. *Plant, Cell & Environment*, 38(9): 1725–1736

Zhirnova D. F., Babushkina E. A., Belokopytova L. V., Vaganov E. A. (2020) To which side are the scales swinging? Growth stability of Siberian larch under permanent moisture deficit with periodic droughts. *Forest Ecology and Management*, 459: 117841

Ziaco E., Truettner C., Biondi F., Bullock S. (2018) Moisture-driven xylogenesis in *Pinus ponderosa* from a Mojave Desert mountain reveals high phenological plasticity. *Plant, Cell & Environment*, 41(4): 823–836

DOI 10.17516/1997-1389-0383

УДК 630*561.24(292.511.6)

Construction of Centuries-Old Tree-Ring Chronologies of *Pinus sylvestris* L. for the Forest-Steppe and Steppe Zones of the South of Western Siberia

Natalia V. Rygalova*

*Altai State University
Barnaul, Russian Federation*

Received 04.03.2022, received in revised form 23.05.2022, accepted 22.06.2022

Abstract. The tree-ring chronologies (TRCs) of trees growing in arid conditions make it possible to reconstruct the dynamics of moisture in the past. This parameter remains little studied in retrospect compared to the temperature regime. A number of factors (physiological, natural, and anthropogenic) limit the lifespan of trees in the steppe and forest-steppe zones. The existing problem of constructing TRCs for areas with a lack of moisture can be solved by using the historical wood of old houses. The purpose of this study was to construct centuries-old (more than 300 years) tree-ring chronologies for the south of Western Siberia and analyze the results obtained. The study was performed on the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the belt forests of the Altai Territory. A suite of dendrochronological methods was used in the work. The absolute rows of the width of the annual rings were standardized using the method of Regional Curve Standardization (RCS), which made it possible to preserve the low-frequency component in the chronologies. RCS-chronologies of tree rings for pine belt forests were obtained for the first time. Three generalized chronologies were obtained: forest-steppe TRC Barnaul (363 years: 1659–2021) and two steppe TRCs: TRC Volchikha for the arid steppe subzone (333 years: 1686–2018) and TRC Uglovskoe for the dry steppe subzone (388 years: 1626–2013). Pine growth showed multicycle dynamics, and the most pronounced was the 30-year Brückner cycle. For chronologies, a minimum of growth indices was established in the 17th-18th centuries. The end of the Little Ice Age is reflected in an increase in growth indices in the second half of the 19th century. For steppe chronologies, an increase in the variation (range) of growth indices was noted in the 20th century; it resulted from an increase in the frequency of extreme climatic events in the south of Western Siberia, including droughts. The steppe chronologies showed a stable correlation with each other over time but a weak correlation to the forest-steppe tree-ring series. During periods of significant decrease in moisture, this correlation was absent. Extended chronologies make it possible to date old wooden structures, including architectural

© 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: natalia.ml@mail.ru

ORCID: 0000-0002-0078-6133

landmarks. The chronologies constructed using historical wood were found to enable higher accuracy of dating compared to the chronologies obtained only from live trees of pine belt forests.

Keywords: dendrochronology, historical wood, Regional Curve Standardization, steppe, forest-steppe, south of Western Siberia, pine belt forests.

Citation: Rygalova N. V. Construction of centuries-old tree-ring chronologies of *Pinus sylvestris* L. for the forest-steppe and steppe zones of the south of Western Siberia. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(2), 202–220. DOI: 10.17516/1997-1389-0383

Построение многовековых древесно-кольцевых хронологий *Pinus sylvestris* L. для лесостепной и степной зон юга Западной Сибири

Н. В. Рыгалова

*Алтайский государственный университет
Российская Федерация, Барнаул*

Аннотация. Древесно-кольцевые хронологии (ДКХ) деревьев, произрастающих в засушливых условиях, позволяют восстановить динамику увлажнения прошлого. Данный параметр остается малоисследованным в ретроспективе по сравнению с температурным режимом. Ряд факторов (физиологических, природно-антропогенных) ограничивает продолжительность жизни деревьев в степной и лесостепной зонах. Существующую проблему построения длинных ДКХ для территорий с дефицитом влаги возможно решить путем привлечения исторической древесины старых домов. Целью данного исследования является построение многовековых (более 300 лет) древесно-кольцевых хронологий для юга Западной Сибири и анализ полученных результатов. Объектом изучения является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) ленточных боров Алтайского края. В работе применен комплекс дендрохронологических методов, стандартизация абсолютных рядов ширины годовичных колец проведена методом региональных кривых (RCS), что позволило сохранить низкочастотную составляющую в древесно-кольцевом ряду. RCS-хронологии для ленточных боров были получены впервые. В результате было построено три обобщенных хронологии: лесостепная ДКХ Барнаул (363 года: 1659–2021 гг.) и две степных: ДКХ Волчиха для подзоны засушливой степи (333 года: 1686–2018 гг.) и Угловское для подзоны сухой степи (388 лет: 1626–2013 гг.) В динамике прироста сосны обнаружена полицикличность, наиболее выраженным является 30-летний цикл Брикнера. Для хронологий установлен минимум индексов прироста в XVII–XVIII вв. Окончание малого ледникового периода находит отражение в увеличении индексов прироста во второй половине XIX в. Для степных хронологий отмечено усиление вариации (размаха) индексов прироста в XX в., что обусловлено увеличением частоты повторяемости экстремальных климатических явлений на юге Западной Сибири, в том числе засух. Степные хронологии показали устойчивую во времени связь друг с другом, но слабую связь с лесостепным древесно-кольцевым рядом (в периоды значительного снижения увлажнения эта

связь отсутствует). Продленные хронологии позволяют датировать старые деревянные сооружения, в том числе архитектурные памятники. Установлено преимущество в точности датировок хронологий, построенных с привлечением исторической древесины, перед хронологиями, которые получены только по живым деревьям ленточных боров.

Ключевые слова: дендрохронология, историческая древесина, стандартизация региональной кривой, степь, лесостепь, юг Западной Сибири, ленточные боры.

Цитирование: Рыгалова, Н. В. Построение многовековых древесно-кольцевых хронологий *Pinus sylvestris* L. для лесостепной и степной зон юга Западной Сибири / Н. В. Рыгалова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 202–220. DOI: 10.17516/1997-1389-0383

Введение

Деревья, произрастающие в засушливых условиях, всегда привлекали с дендроклиматической точки зрения как индикаторы увлажнения территории. Под территориями с засушливыми условиями подразумеваются южная часть лесостепной и степная природные зоны (где гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова менее 1,0). Первая дендрохронологическая работа по территориям с дефицитом влаги была выполнена в России более 100 лет назад (Шведов, 1892), в настоящее время отмечается увеличение публикаций по данной тематике (Demina et al., 2017; Matveev et al., 2017; Вахнина и др., 2018; Искандиров и др., 2019; Babushkina et al., 2019; Chernogaeva et al., 2020; Kostyakova et al., 2018; Tabakova et al., 2020; Agafonov et al., 2021; Demina et al., 2022). В большинстве работ исследуемый период ограничен XIX–XXI вв., реже включает XVIII в.

Ленточные боры юга Западной Сибири, произрастающие в основном в засушливых условиях, также были объектом дендрохронологического изучения и ранее (Оленин, Мазепа, 1988; Магда, 2003; Малышева, Быков, 2011; Рыгалова, Быков, 2015; Agafonov et al., 2021). Они произрастают на южной границе широтного ареала *Pinus sylvestris* L., что определяет лимитирующее значение климатических факторов для роста деревьев.

Практически вдоль этих субмеридионально расположенных боров меняется градиент увлажнения от относительно оптимального на северо-востоке до недостаточного на юго-западе. Исследуемые леса представляют собой уникальную, реликтовую геосистему. Длительный период развития боров и контрастные природные условия в различных частях предопределили присутствие внутривидовых отличий *P. sylvestris*: с северо-востока на юго-запад подвид с. сибирская меняется на с. кулундинская (Правдин, 1964).

Одновременно с тем, что боры представляют собой интересный дендроклиматический объект, большая часть полученных древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) имеет небольшую продолжительность (130–200 лет) (Рыгалова, 2018). Основной причиной является высокая хозяйственная освоенность лесостепной и степной зон, также можно отметить физиологические ограничения радиального роста сосны, произрастающей в данных условиях (Правдин, 1964). Старые деревья (200 лет и более) зачастую являются единичными находками, в связи с чем самый ранний период обобщенной хронологии не обеспечен необходимым количеством индивидуальных рядов, что ставит под сомнение достоверность климатических реконструкций этого временного отрезка. При этом восстановление динамики

увлажнения внутренних территорий Евразии является важной фундаментальной задачей. Таким образом, встает вопрос: возможно ли получить длинные древесно-кольцевые хронологии для засушливых территорий России? Представленная работа отражает результаты исследования, направленного на решение такой задачи для юга Западной Сибири. В статье рассмотрены потенциальные возможности создания многовековых ДКХ для лесостепной и степной природных зон с использованием материала по живым деревьям, а также привлечением исторической древесины строений.

Материалы и методы

Территорией исследования являются ленточные боры, произрастающие в пограничной области России и Казахстана на юге Западно-Сибирской равнины, большая часть которых локализована в Алтайском крае. Боры представляют собой островные лесные образования, сформировавшиеся на песчаных отложениях древних долин стока (Грибанов, 1954), и являются в настоящее время экстремальными ландшафтами в условиях лесостепи и степи. Рельеф боров неоднородный, меняется от пологоволнистого до бугристо-грядового, что создает предпосылки для формирования топоэкологических различий в условиях произрастания деревьев. Видом-эдификатором является сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), для которой данное географическое положение можно отнести к южному пределу ее широтного ареала (Правдин, 1964).

Формирование базы данных древесно-кольцевых хронологий ширины годичных колец было начато 10 лет назад (Мальшева, Быков, 2011) и продолжается до сих пор. В 2018–2019 гг. было проведено масштабное исследование, направленное на определение возможности продления ДКХ ленточных бо-

ров, полученных по растущим деревьям. Для этого было изучено более 50 старых деревянных объектов в 25 приборных селах края и г. Барнауле (в общей сложности было получено 554 «плавающие» хронологии).

В данной статье представлены результаты продления трех обобщенных хронологий (Барнаул, Волчиха и Угловское (Круглое)), приуроченных к различным физико-географическим зонам (рис. 1). ДКХ степной зоны наиболее интересны с точки зрения климатических реконструкций. Однако хронологии южной лесостепи востребованы в качестве основы для датирования архитектурных памятников, которые имеют более значительную концентрацию в данной подзоне по причине более раннего освоения.

Климат территории исследования является умеренно континентальным (Харламова, Силантьева, 2011). По температурному режиму территория боров в северной и южной частях достаточно схожа (рис. 1), но по количеству осадков отличается на 100 мм (440 мм в северной части (гидрометеорологическая станция (ГМС) Барнаул) и 340 мм на границе засушливой и сухой степи (ГМС Рубцовск), рассчитано для периода 1990–2019 гг.). При этом связь между рядами осадков метеостанций лесостепи и степи слабая (Харламова, Силантьева, 2011). Для роста растений на южном пределе распространения наибольшее значение имеет соотношение тепла и влаги, охарактеризованное через ГТК Г.Т. Селянинова (Хромов, Мамонтова, 1974), который для северной части (ГМС Барнаул) равен 0,9, для южной (ГМС Рубцовск) – 0,5 (Kharlamova, 2020).

Лесостепная хронология Барнаул построена при использовании кернов 29 живых деревьев, полученных для бора в границах Барнаула (на удалении 8,5 км от основной застройки по направлению лесной ленты), и 58

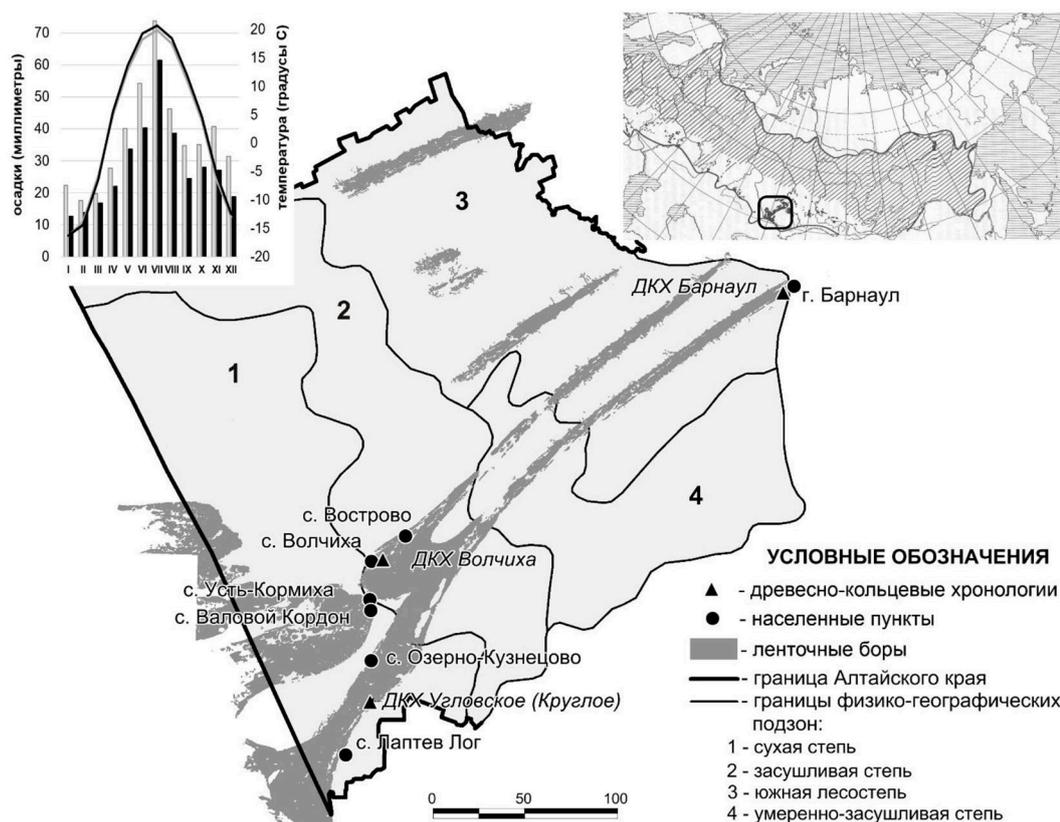


Рис. 1. Территориальная привязка древесно-кольцевых хронологий, построенных по живым деревьям сосны и исторической древесины, собранной в приборовых населенных пунктах. Физико-географическое районирование по (Алтайский край. Атлас, 1978). На вставке справа (Правдин, 1964) показаны зональные границы ареала распространения сосны обыкновенной, квадратом обозначена территория исследования; На вставке слева – климатограмма для периода 1990–2019 гг. для гидрометеорологических станций Барнаул (серая линия и гистограмма) и Рубцовск (черная линия и гистограмма) по данным ВНИИГМИ-МЦД, <http://www.meteo.ru>

Fig. 1. Territorial reference of tree-ring chronologies constructed using live pine trees and historical wood collected in settlements located at pine forests. Physical and geographical zoning according to (Altai Territory. Atlas, 1978). The inset on the right (Pravdin, 1964) shows the zonal boundaries of the Scots pine range; the square indicates the study area. The inset on the left shows the climate diagram for the period of 1990–2019 for weather stations Barnaul (gray line and histogram) and Rubtsovsk (black line and histogram) according to VNIIGMI-MCD, <http://www.meteo.ru>

образцов исторической древесины, взятых с пяти старых домов города. Хронология Волчиха отнесена к подзоне засушливой степи, хотя территориально она близка к границе с сухостепной подзоной. ДКХ создана на основе образцов 20 живых деревьев и 57 образцов древесины домов села Волчиха (три дома), находящегося в непосредственной близости от модельного участка в бору, сел Вос-

трово (один дом), Усть-Кормиха (один дом) и Вальной Кордон (один дом), расположенных на расстоянии около 20 км от полигона исследования в лесу. Для создания сухостепной продленной хронологии Угловское использовались ряды 28 живых деревьев Угловское (Круглое) и 45 образцов исторической древесины, полученной в селах Озерно-Кузнецово (два дома, 20 км от модельного участка)

и Лаптев Лог (три дома, 30 км от модельного участка) (рис. 1).

Сбор образцов живых деревьев осуществлялся возрастным буравом Haglof на высоте 1,3 м, сбор исторической древесины производился с помощью бура для сухой древесины Berlin-type corer и бензопилы. Спилены, являющиеся наиболее удобным и информативным материалом при работе с исторической древесиной, брали с выступающих концов бревен, сложенных в срубе по технологии «в обло». Обработка образцов проводилась по стандартной методике (Шиятов и др., 2000). Измерение ширины годичных колец живых деревьев и древесины деревянных домов было выполнено на установке LINTAB 6 в программе TSAP-Win. Перекрестное датирование образцов исторической древесины (важнейший метод, позволяющий провести абсолютное датирование плавающих хронологий исторической древесины (Schweingruber, 1983)) осуществлялось в программе Cofecha, а также с помощью одноименной встроенной функции в TSAP-Win. Построение обобщенных хронологий было произведено в программе ARSTAN. Наличие образцов деревьев, произраставших в разные временные периоды (в настоящее время и ранее), позволило впервые для ленточных боров применить RCS-стандартизацию (Melvin et al., 2007) с целью сохранения низкочастотной составляющей в изменчивости радиального прироста при построении обобщенной хронологии. В качестве аппроксимирующей кривой выбран скользящий кубический сплайн длиной 66,7 % от продолжительности ряда (Cook, Peters, 1981). В работе представлена стандартная (std) индексированная хронология, в которой максимально сохранены длиннопериодические колебания.

Для характеристики полученных обобщенных хронологий, кроме основных стати-

стических показателей, были рассчитаны коэффициенты чувствительности (Fritts, 1976), межсерийный коэффициент корреляции (RBAR) и выраженный сигнал популяции (EPS) (Cook, Kairiukstis, 1990), для оценки связи между хронологиями использованы коэффициенты корреляции Пирсона (r) и коэффициенты синхронности (S) (Шиятов, 1986). Выделение циклической составляющей в рядах прироста сосны осуществлено с помощью спектрального анализа Фурье (Bloomfield, 2000) в программе Statistica 13.3.

Результаты и обсуждение

Продолжительность имеющихся в настоящее время хронологий ширины годичных колец, полученных по живым деревьям ленточных боров, колеблется от 105 лет до 281 года. Четкой зависимости продолжительности ДКХ от степени засушливости климата, нарастающей к югу и юго-западу, нет (рис. 2), хотя известно, что ухудшение лесорастительных условий в связи с ростом дефицита влаги приводит к снижению радиального прироста (Парамонов, 2014). Основными причинами низкой сохранности старых деревьев, кроме природно-климатических и внутренних физиологических факторов, являются лесохозяйственная освоенность территории (в настоящее время в рубку ухода рекомендованы деревья с минимальным диаметром ствола (на высоте 1,3 м) от 44 см в северной части боров до 40 см – в южной (Парамонов, 2014) и подверженность пожарам. В случае, когда удастся построить ДКХ продолжительностью более 200 лет, зачастую самый ранний период обеспечен минимальным количеством древесно-кольцевых рядов деревьев, что не отвечает требованию качественной хронологии.

Использование исторической древесины для продления ДКХ также имеет свои объ-

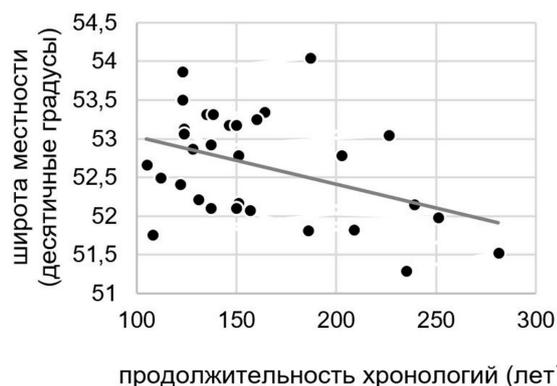


Рис. 2. Зависимость продолжительности обобщенных ДКХ от географической широты модельного участка

Fig. 2. Dependence of the duration of the generalized TRCs on the geographical latitude of the model area

ективные ограничения. Полученные выводы сделаны на основе обследования старых деревянных домов в 2018–2019 гг. в приборовых населенных пунктах Алтайского края. Во-первых, сохранность деревянных сооружений, созданных более 150–200 лет назад, на территории исследования низкая. Подавляющее большинство памятников деревянного зодчества и объектов культурного наследия региона, построенных из дерева и приуроченных к территории исследования, датируются концом XIX – началом XX в. (Сведения из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации / Портал открытых данных Министерства культуры Российской Федерации. URL: <https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-egrkn>. Дата обращения: 28.08.2021). При этом большим потенциалом обладает лесостепная зона (Рыгалова, 2018), которая осваивалась русскими переселенцами раньше (с XVIII в.), чем степная (в основном в конце XIX – начале XX в.) (История Алтая, 2019). Во-вторых, продолжительность плавающих хронологий, полученных со старых домов, ограничена. Средняя длина всех

индивидуальных «плавающих» древесно-кольцевых рядов, полученных по всем изученным деревянным объектам в 2018–2019 гг. (более 500 хронологий), равна 112 годам. На группу древесно-кольцевых серий, продолжительность которых менее 100 лет, приходится половина (49 %) всех полученных рядов (рис. 3). Доля индивидуальных серий длиной более 200 лет составляет только 4 % от их общего количества.

Однако, несмотря на указанные сложности и ограничения, было получено три продленных древесно-кольцевых хронологий по ленточным борам: Барнаул (таблица, рис. 1, 4А-6А), Волчиха (таблица, рис. 1, 4Б-6Б), Угловское (таблица, рис. 1, 4В-6В).

Полученные ДКХ характеризуются цикличностью. Длина древесно-кольцевых рядов позволяет выделять циклы не более вековых. В степных хронологиях (наиболее у ДКХ Угловское) выражен 30-летний цикл Брикнера (Brückner, 1890), что объясняется большим лимитирующим значением осадков на прирост в засушливых условиях (цикл Брикнера обнаружен в колебаниях атмосферных осадков (Шнитников, 1957) и часто фиксируется в «южных» хронологиях (Шиятов,

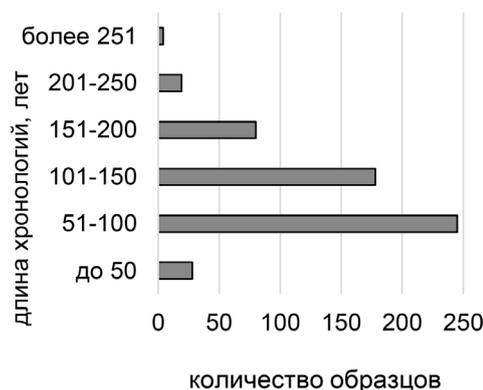


Рис. 3. Группировка хронологий исторической древесины по продолжительности

Fig. 3. Grouping historical wood chronologies by duration

1986; Оленин, Мазепа, 1988; Matveev et al., 2017; Demina et al., 2017)). Цикл с подобной длиной (32 года) отмечен и у ДКХ Барнаул. У ДКХ Угловское определен полувековой цикл (48–49 лет), у всех хронологий был обнаружен квазивековой цикл (60–80-летний), у ДКХ Волчиха – вековой (110 лет). Циклы с более высокой частотой также представлены, но менее выражены (например, 21-летний цикл у степных хронологий и 18-летний у ДКХ Барнаул).

Наполняемость серий практически равномерная на протяжении всего периода с уменьшением репликации образцов на более раннем отрезке (рис. 5). Максимальное количество образцов приходится на XIX в.

Межсерийные коэффициенты корреляции, рассчитанные по 50-летиям, невысоки: колеблются на уровне 0,3–0,4 у степных хронологий и 0,2 у лесостепной хронологии (рис. 6), для полной длины ДКХ коэффициент опускается ниже (см. табл.). Это связано с особенностями проявления единого сигнала в ширине годичных колец на южном пределе распространения хвойных: он может трансформироваться в зависимости от топоэкологических условий местности, что отмечалось и для других засушливых территорий ранее

(Adams et al., 2014; Babushkina, Belokopytova, 2014). Большая часть осадков в период вегетации является конвективной, что обуславливает мозаичность их выпадения по территории. Неровный рельеф боровых ложин, где сформировались сосновые леса, обеспечивает перераспределение атмосферных осадков, а также различную доступность грунтовых вод для деревьев на разных участках. Глубина их залегания меняется от 1 м в западинах до 40 м на буграх, а также подвержена циклическим колебаниям (Грибанов, 1954). Эти факторы определяют неравномерность в обеспеченности влагой деревьев на межфациальном уровне, что отражается в свою очередь на нарушении синхронности годичного прироста и снижении RVAR. На уменьшение согласованности прироста кроме топоэкологических условий может влиять внутривидовая (генетическая) неоднородность материала: в ленточных борах встречается два подвида сосны, приуроченных к северной и южной частям. В связи с тем, что полученные хронологии представляют собой результат объединения территориально разобщенного материала (строительная древесина заготавливалась на различном удалении от модельной площадки, для которой получена ДКХ по живым

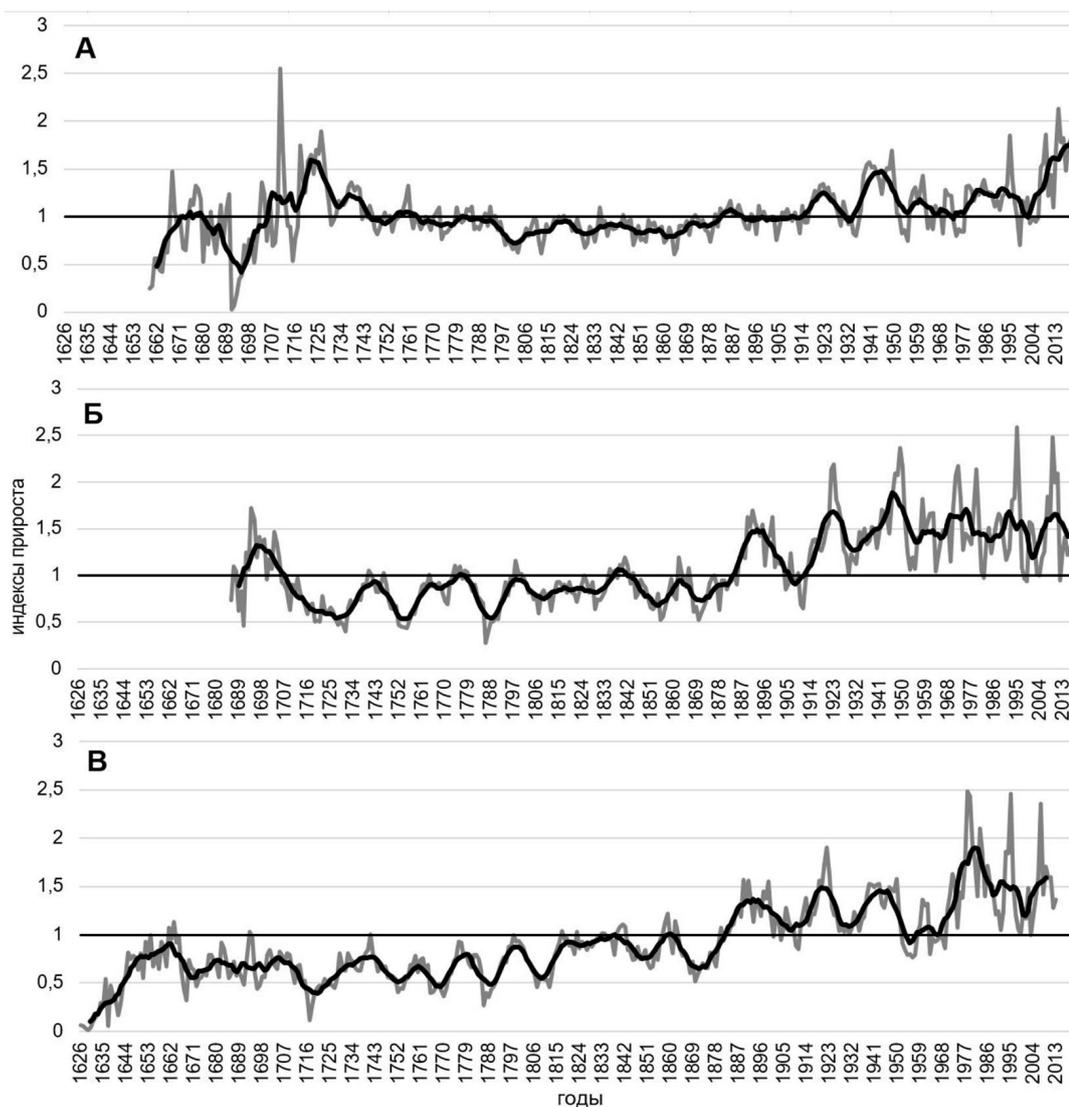


Рис. 4. Стандартизированные (std) продленные древесно-кольцевые хронологии: А – Барнаул, Б – Волчиха, В – Угловское (серая кривая – погодичные значения индексов прироста, черная кривая – сглаживающая линия (9-летнее осреднение))

Fig. 4. Standardized (std) extended tree-ring chronologies: A – Barnaul, B – Volchikha, C – Uglovskoe (gray curve – annual values of growth indices, black curve – smoothing line (9-year averaging))

деревьям), отмечается падение межсерийных коэффициентов корреляции. Наиболее сильно это выражено для лесостепной хронологии Барнаул.

Представленные древесно-кольцевые ряды получены для переходного экотона лесостепь/степь, неоднородного по уровню увлажнения (от относительно оптимального

увлажнения (Барнаул) до выраженного дефицита осадков (Угловское)), но при этом все хронологии характеризуются низким коэффициентом чувствительности, что уже фиксировалась ранее (Малышева, Быков, 2011; Рыгалова, Быков, 2015; Agafonov et al., 2021). При осреднении индивидуальных серий с недостаточно высокими значениями меж-

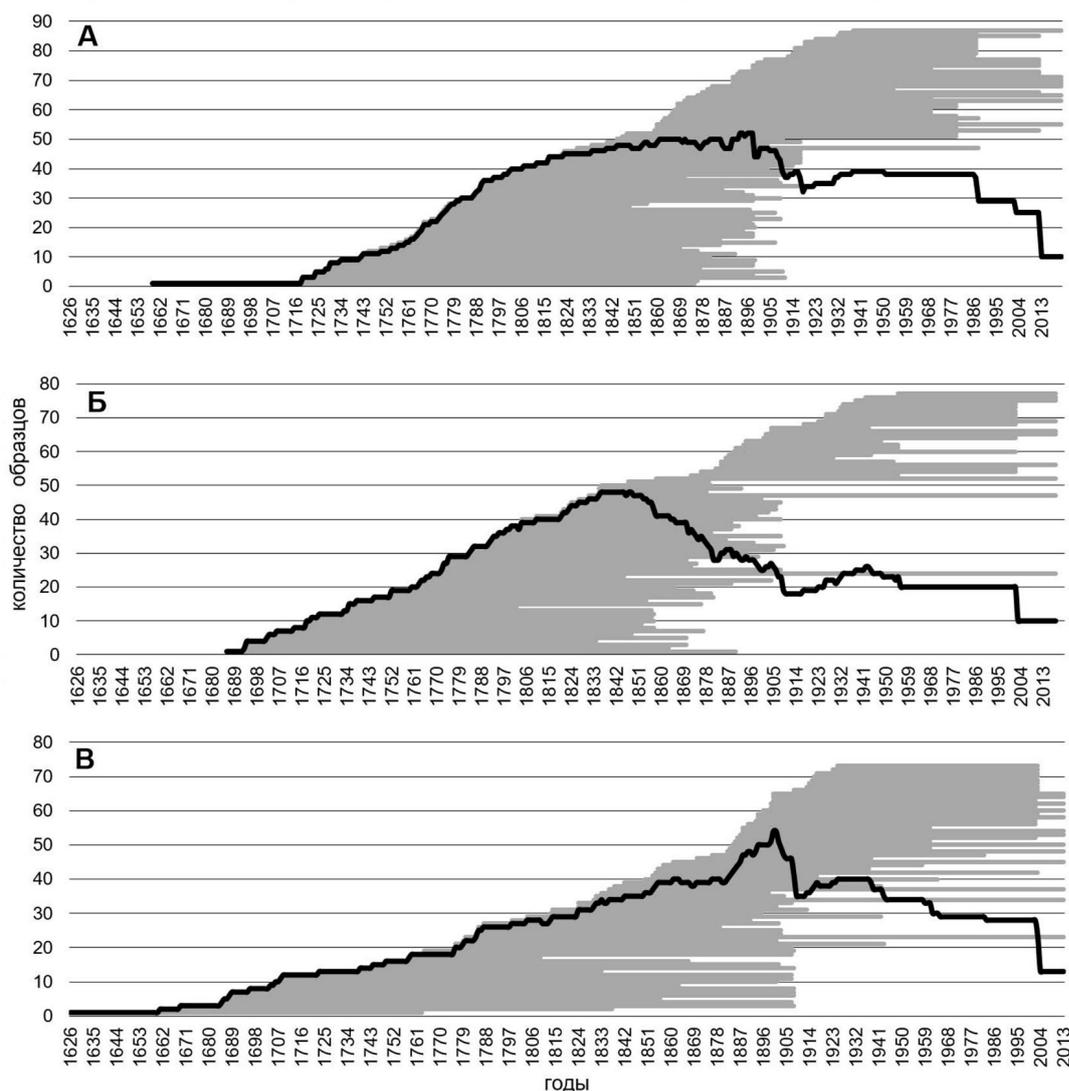


Рис. 5. Наполняемость образцами обобщенных древесно-кольцевых хронологий: А – Барнаул, Б – Волчиха, В – Угловское (черные горизонтальные линии – индивидуальные древесно-кольцевые серии, серая кривая показывает обеспеченность индивидуальными сериями по годам)

Fig. 5. The overall number of samples by generalized tree-ring chronologies: А – Barnaul, В – Volchikha, С – Uglovskoe (black horizontal lines – individual tree-ring series, the gray curve shows the supply of individual series by years)

серийной корреляции и синхронности наблюдается эффект «сглаживания пиков», что приводит к уменьшению вариации индексов и, как следствие, к снижению коэффициента чувствительности. Последнее подтверждается тем фактом, что индексированные (std) обобщенные хронологии характеризуются

низкой чувствительностью (таблица) в отличие от индивидуальных стандартизированных рядов (средний коэффициент чувствительности для лесостепных серий равен 0,21, для степных – 0,22). Изучение изменчивости коэффициента чувствительности обобщенной ДКХ по 50-летиям выявило обратную

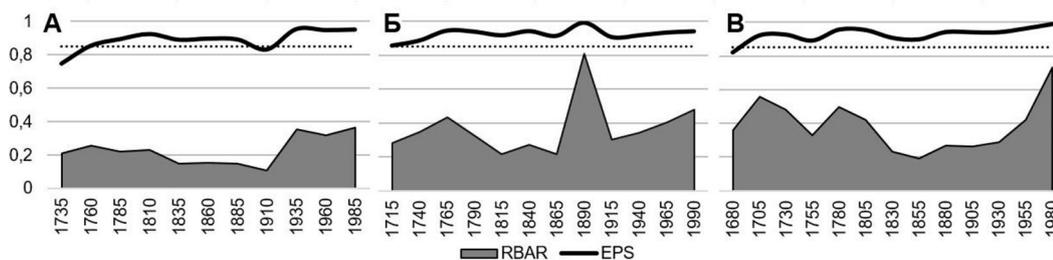


Рис. 6. Межсерияльная корреляция (RBAR) и выраженный сигнал популяции (EPS) для обобщенных хронологий Барнаул (А), Волчиха (Б) и Угловское (В) по 50-летиям. Пунктирная линия соответствует значению 0,85 (для EPS), которое является пограничным при оценке качества ДКХ (Cook, Kairiukstis, 1990)

Fig. 6. Interserial correlation (RBAR) and expressed population signal (EPS) for generalized chronologies of Barnaul (A), Volchikha (B) and Uglovskoe (C) for 50 years. The dotted line corresponds to the value 0.85 (for EPS), which is borderline in assessing the quality of the tree-ring chronology (Cook, Kairiukstis, 1990)

Таблица. Характеристика продленных стандартизированных (std) хронологий

Table. Characterization of extended standardized (std) chronologies

Название хронологий	Физико-географ. подзона*	Продолжительность, лет	Период, годы	Количество образцов (из них живых деревьев), шт	Средняя продолжительность индивид. рядов, лет	RBAR	Коэффициент чувствительности	Среднее арифметическое ± стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
Барнаул	ЮЛ	363	1659–2021	87 (29)	119	0,14	0,15	1,03 ± 0,30	30
Волчиха	ЗС	333	1686–2018	77 (20)	107	0,21	0,15	1,08 ± 0,41	38
Угловское	СС	388	1626–2013	73 (28)	126	0,23	0,17	0,90 ± 0,40	45

Примечание: * физико-географические подзоны (Алтайский край. Атлас, 1978): ЮЛ – южная лесостепь, ЗС – засушливая степь, СС – сухая степь.

зависимость этого показателя от количества образцов данного временного отрезка: чем больше наполняемость индивидуальными рядами, тем ниже коэффициент чувствительности. Эта зависимость подтверждается математически (коэффициент достоверности аппроксимации построенных линейных трендов (R^2) для хронологий Барнаул и Угловское (рис. 7) выше 0,6).

В динамике полученных хронологий прослеживается общий тренд: средние (медианные) значения индексов прироста увеличиваются с середины XVII в. и достигают максимума в конце XX в. Практически так же меняется величина их размаха (рис. 8). Мини-

мальные значения индексов характерны для степных хронологий (наиболее выражены для ДКХ Угловское) и приурочены к XVII–XVIII вв. Для лесостепной хронологии минимальные значения зафиксированы в конце XVII в. и в первой половине XIX в. Повышение медианного значения и всплеск размаха индексов в первой половине XVIII в., вероятнее всего, не связаны с климатическими причинами, а являются результатом некорректной аппроксимации кривых в начале роста деревьев. Увеличение радиального прироста по всем рядам фиксируется во второй половине XIX в. (рис. 4, рис. 8), когда величина древесно-кольцевых индексов прироста ста-

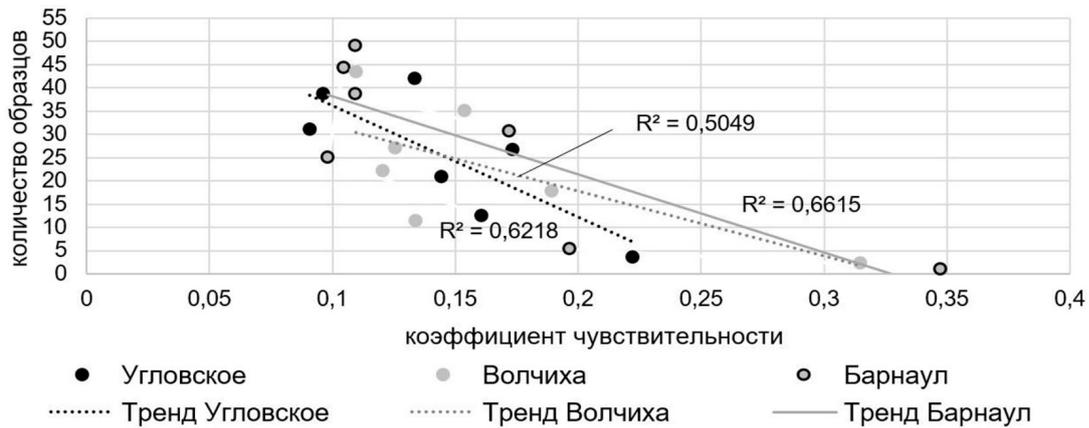


Рис. 7. Зависимость значений коэффициентов чувствительности от количества образцов, представленных в обобщенной хронологии по пятидесятилетиям

Fig. 7. Dependence of the values of the sensitivity coefficients on the number of samples presented in the generalized chronology for fifty years

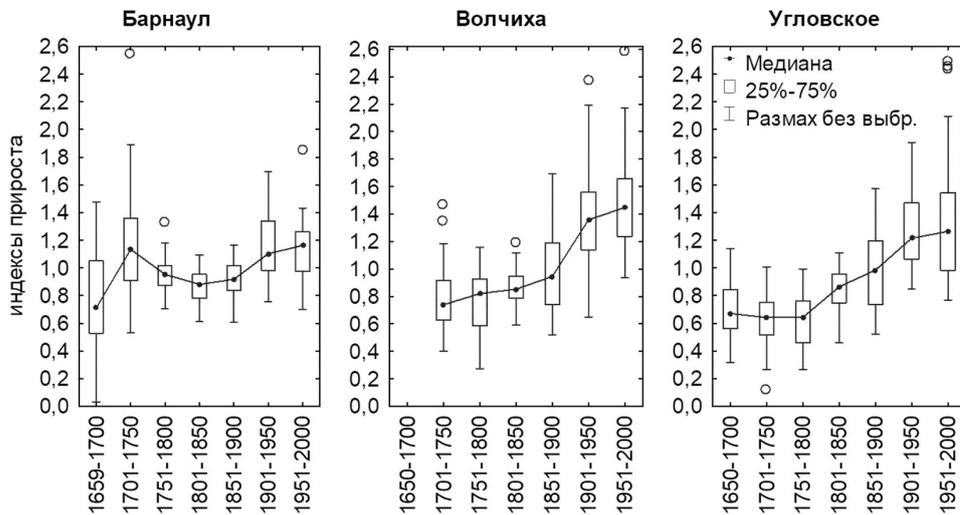


Рис. 8. Характеристика изменчивости индексов прироста по периодам

Fig. 8. Characteristics of the variability of growth indices by periods

новится больше 1,0 (для степных ДКХ тренд на увеличение более выражен). Так в хронологиях проявляется завершение малого ледникового периода.

Наблюдаемое увеличение размаха значений индексов прироста в XX в. (прежде всего у степных хронологий) связано с ростом числа экстремальных проявлений климата (в частности, засух), фиксируемых для юга Западной

Сибири и усилением экстремумов климатических величин (Харюткина и др., 2019), в частности связанных с увлажнением. Это приводит к значительным вариациям индексов в южных древесно-кольцевых хронологиях в XX в., в том числе к увеличению числа и глубины минимумов прироста деревьев.

Для понимания особенностей прироста деревьев в лесостепной и степной зонах

полученные хронологии были сопоставлены между собой за период, обеспеченный всеми рядами (1786–2013 гг.). Это позволило выявить тесную связь степных хронологий между собой (коэффициент корреляции (r) ДКХ Угловское / Волчиха равен 0,79, коэффициент синхронности (S) – 72) в отличие от лесостепной хронологии (ДКХ Угловское / Барнаул: $r = 0,34$, $S = 63$; ДКХ Волчиха / Барнаул: $r = 0,34$, $S = 65$). Такие результаты обусловлены пространственными различиями в условиях увлажнения в лесостепи и засушливой / сухой степи.

Трансформация связи между хронологиями происходит как в пространстве, так и во времени. Расчет скользящих коэффициентов корреляции (временное окно – 31 год, шаг смещения – 1 год) показал устойчи-

вость положительной статистически значимой связи между хронологиями степи: Волчиха и Угловское. Сходство степных ДКХ и хронологии Барнаул характеризуется как нестабильное: в XX в., в первой половине XIX в. и в середине XVIII в. коэффициенты корреляции преодолевают порог значимости (рис. 9); в остальные периоды связь отсутствует или на короткий период становится обратной. В изменчивости тесноты связи также прослеживается периодичность (наиболее выражен 32–33-летний цикл Брикнера), что указывает на проявление климатического фактора. Это доказывается путем сопоставления осредненного ряда ГТК (11-летнее сглаживание) и рядов коэффициентов корреляции Барнаул/Волчиха и Барнаул/Угловское ($r_{Б/В} = 0,63$ и

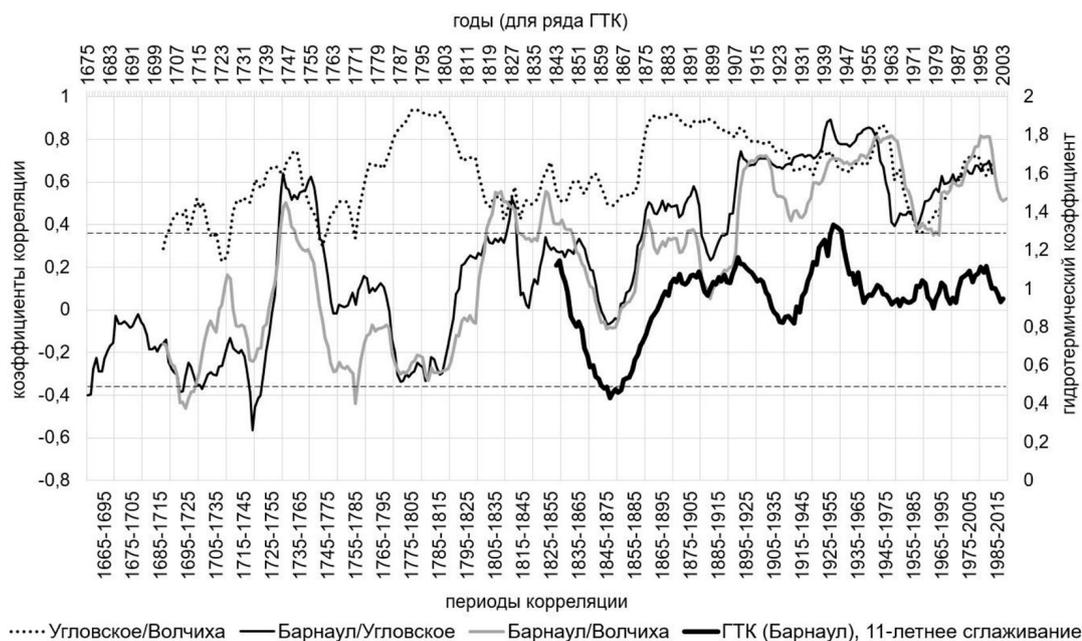


Рис. 9. Скользящая корреляция отдельных продленных хронологий между собой (коэффициенты корреляции выше $|0,36|$ (горизонтальная пунктирная линия) значимы при $p < 0,05$) и осредненный ряд гидротермического коэффициента (ГТК), рассчитанного по данным ГМС Барнаул (ВНИИГМИ-МЦД, <http://www.meteo.ru>)

Fig. 9. Sliding correlation of individual extended chronologies with each other (correlation coefficients higher than $|0,36|$ (horizontal dashed line) are significant at $p < 0,05$) and the averaged series of hydrothermal coefficient, calculated according to the data of weather station Barnaul (VNIIGMI-MCD, <http://www.meteo.ru>)

$r_{BY} = 0,72$, значимы при $p < 0,05$), также фиксируется визуально (рис. 9).

Таким образом, разрыв связи между лесостепной и степными ДКХ приурочен к периодам значительного снижения увлажнения территории. Наиболее это выражено в 1856–1870-е гг., когда средний ГТК по Барнаулу был равен 0,5 (при современном уровне около 1,0). Если в северо-восточной части ленточных боров сосна испытывала сильное иссушение, то в юго-западной оказалась в условиях экстремально жесткого дефицита влаги. В такие периоды значительно увеличивается дискретность выпадающих конвективных осадков, что приводит к разрыву связей между лесостепной и степными ДКХ и снижению синхронности (корреляции) прироста сосны даже на относительно близких участках (в границах одной зоны и подзоны), что также видно по корреляционному ряду Волчиха / Угловское.

Необходимо указать на важный момент, связанный с самим процессом продления, который влияет на качество получаемых хронологий. Это отсутствие сведений (в подавляющем большинстве случаев) о том, откуда привозили древесину для строительства домов. Местные жители одного из степных сел свидетельствовали о случаях привоза строительного леса с другого берега Оби (подзона средней лесостепи), что достаточно сильно расширяет территориальные рамки получаемых хронологий. В условиях региональной неоднородности в приросте сосны ленточных боров это может вносить дополнительный шум в продленные серии. Проблема определения места заготовки древесины особенно остро проявилась при датировке домов в г. Барнауле. В связи с тем, что невозможно было определить территориальный источник древесины, в качестве основы для продления была выбрана ДКХ ленточных

боров Барнаул. Но падение межсерийной корреляции (и, как следствие, снижение EPS до 0,833) на стыке XIX–XX вв. (рис. 6) указывает на слабое сопоставление хронологий живых деревьев и исторической древесины, которая, вероятно, была привезена. В пользу этого также свидетельствует тот факт, что рубка деревьев в ленточном бору под Барнаулом в XVIII–XIX вв. была ограничена потребностями металлургического производства города (Карпенко, 2017). При этом растущий населенный пункт требовал значительного притока лесоматериалов, которые могли поставляться из других лесозаготовительных районов края.

Стоит отметить значимость продленных хронологий для датирования старых деревянных сооружений, построенных до XX в. ДКХ, полученные только по живым деревьям боров, зачастую или не имеют достаточной продолжительности (достоверные датировки можно получить при перекрытии рядов на отрезке 100 лет и более), или их ранний период представлен 1–3 образцами, что не позволяет выполнить качественную датировку. Увеличение наполняемости начальных отрезков обобщенных хронологий индивидуальными сериями исторической древесины позволяет решить этот вопрос. По вышеобозначенной причине использование самых длинных ДКХ живых деревьев (Малиновое озеро (1733–2013 гг.) (Рыгалова, 2018), Васильчуки (1781–2018 гг.) для датирования исторической древесины не дало определенных результатов. Основные датировки деревянных сооружений в приборовых населенных пунктах были проведены именно по представленным в работе продленным степным хронологиям, в том числе и в селах, расположенных в южной лесостепи. Работа по датированию исторической древесины продолжается с целью увеличения продолжительности имеющих-

ся и получения новых длинных древесно-кольцевых серий.

Заключение

Продление хронологий в прошлое с привлечением исторической древесины позволяет решить вопрос с недостаточной репликацией образцов на ранних отрезках ДКХ по живым деревьям и увеличить их продолжительность. В ходе выполненных работ получено три обобщенных хронологии сосны ленточных боров, продленных в прошлое за счет привлечения исторической древесины старых домов в приборовых населенных пунктах Алтайского края. ДКХ приурочены к лесостепной, засушливо-степной и сухостепной подзонам юга Западной Сибири. Отмечено, что при объединении в одной ДКХ нескольких локальных хронологий, полученных по отдельным домам или по отдельным селам, может наблюдаться снижение межсерийного коэффициента корреляции (в связи с трансформацией климатического сигнала на уровне местообитания в локальных ДКХ) и, как следствие, снижение EPS.

Благодаря использованию стандартизации региональной кривой (RCS), впервые примененной для древесно-кольцевых серий ленточных боров, в полученных обобщенных ДКХ сохранен низкочастотный климатический сигнал. Медианные значения

индексов прироста увеличиваются с середины XVII в. и достигают максимума в конце XX в. Минимальные значения индексов отмечены в XVII–XVIII вв. (с наименьшими значениями для сухостепной хронологии Угловское). Увеличение радиального прироста фиксируется в конце XIX в. и приурочено к завершению малого ледникового периода. Отмечается усиление размаха индексов прироста степных хронологий к концу XX в., что, вероятнее всего, связано с ростом числа экстремальных проявлений климата, в том числе засух на юге Западной Сибири.

Спектральный анализ показал присутствие в динамике индексов прироста циклов различной продолжительности, сильнее выражены они в степных хронологиях (особенно в ДКХ Угловское). Наибольшее проявление в рядах получил 30-летний цикл Брикнера, отвечающий за изменчивость увлажнения территории.

Выявлена устойчивая связь степных хронологий во времени, при этом связь между лесостепной и степными ДКХ нестабильна во времени и нарушается в периоды снижения увлажнения территории. Этот факт позволяет говорить о климатообусловленной динамике индексов прироста сосны ленточных боров и возможности использования полученных продленных рядов в дендроклиматических реконструкциях в степной зоне на юге Западной Сибири.

Список литературы / References

Алтайский край. Атлас (1978) Т. I. М., Барнаул, ГУГК, 222 с. [*Altai Territory. Atlas*. (1978) Vol. I. Moscow, Barnaul, Main Directorate of Geodesy and Cartography, 222 p. (in Russian)]

Вахнина И. Л., Оязов В. А., Замана Л. В. (2018) Динамика увлажнения в степной зоне юго-восточного Забайкалья с начала XIX столетия по кернам сосны обыкновенной. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, 2: 28–33 [Vakhnina I. L., Obyazov V. A., Zamana L. V. (2018) Dynamics of humidification in the steppe zone of Southeastern Transbaikalia since the beginning of the 19th century evidenced by the cores of scots pine. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography* [Vestnik Moskovskogo universiteta. Seria 5. Geografia], 2: 28–33 (in Russian)]

Грибанов Л. Н. (1954) *Ленточные боры Алтайского края и Казахстана*. М., Наука, 112 с. [Gribanov L. N. (1954) *Pine belt forests of the Altai Territory and Kazakhstan*. Moscow, Nauka, 112 p. (in Russian)]

Искандиров П. Ю., Тишин Д. В., Чижикова Н. А. (2019) Дендроклиматический потенциал сосны обыкновенной Приволжской возвышенности Ульяновской области. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 21(2): 127–130 [Iskandirov P. Yu., Tishin D. V., Chizhikova N. A. (2019) Dendroclimatic potential of the Scots pine of the Volga Upland of the Ulyanovsk Region. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk], 21(2): 127–130 (in Russian)]

История Алтая: в 3-х т. Т. 2: Алтай в конце XVII – начале XX в. (2019) Скубневский В. А. (ред.) Барнаул, Издательство Алтайского университета; Белгород, Константа, 300 с. [*History of Altai: in 3 volumes. Vol. 2: Altai in the late 17th – early 20th centuries* (2019) Skubnevskii A. V. (Ed.) Barnaul, Altai University; Belgorod, Konstanta, 300 p. (in Russian)]

Карпенко Е. А. (2017) Экологические аспекты промышленного лесопользования в Алтайском округе в конце XIX – начале XX в. *Информационный бюллетень Ассоциации «История и компьютер»*, 46: 80–85 [Karpenko E. A. (2017) Ecological aspects of industrial forest management in the Altai District in the late 19th – early 20th century. *Newsletter of the Association “History and Computer”* [Informatsionnyi byulleten’ Assotsiatsii «Istoriya i komp’yuter»], 46: 80–85 (in Russian)]

Магда В. Н. (2003) *Радиальный прирост древесных растений как показатель увлажнения на юге Сибири*: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Красноярск, 21 с. [Magda V. N. (2003) *Radial growth of woody plants as a moisture index in South Siberia*: Abstract of PhD thesis in Biology: 03.00.16. Krasnoyarsk, 21 p. (in Russian)]

Малышева Н. В., Быков Н. И. (2011) *Дендрохронологические исследования ленточных боров юга Западной Сибири*. Барнаул, Азбука, 125 с. [Malysheva N. V., Bykov N. I. (2011) *Dendrochronological studies of pine belt forests of the South of Western Siberia*. Barnaul, Azbuka, 125 p. (in Russian)]

Оленин С. М., Мазепа В. С. (1988) Прогноз климатически обусловленного радиального прироста сосны в ленточных борах Прииртышья. *Экология*, 5: 78–80 [Olenin S. M., Mazepa V. S. (1988) Prediction of climate-responsive radial growth of pines in pine band forests in the Irtysh region. *Ecology* [Ekologiya], 5: 78–80 (in Russian)]

Парамонов Е. Г. (2014) Эколого-экономическое обоснование рубок ухода в ленточных борах Алтая. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 8: 55–59 [Paramonov Y. G. (2014) Ecologic and economic substantiation of improvement felling in belt pine forests of the Altai region. *Bulletin of the Altai State Agrarian University* [Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta], 8: 55–59 (in Russian)]

Правдин Л. Ф. (1964) *Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция*. М., Наука, 191 с. [Pravdin L. F. (1964) *Scots pine. Variability, intraspecific taxonomy and breeding*. Moscow, Nauka, 191 p. (in Russian)]

Рыгалова Н. В., Быков Н. И. (2015) Пространственно-временная изменчивость климатического сигнала древесно-кольцевых хронологий ленточных и Приобских боров. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, 8(4): 394–409 [Rygalova N. V., Bykov N. I. (2015)

Spatiotemporal variation of the climatic signal of tree-rings chronology of the pine belt and Priobie pine forests. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 8(4): 394–409 (in Russian)]

Рыгалова Н. В. (2018) Создание длительных древесно-кольцевых хронологий для лесостепной и степной зон Алтайского края и их использование в исторических исследованиях. *Известия Алтайского государственного университета*, 5: 201–206 [Rygalova N. V. (2018) Creation of long-term tree-ring chronologies for the forest-steppe and steppe zones of the Altai territory and their use in historical research. *Izvestiya of Altai State University* [Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta], 5: 201–206 (in Russian)]

Харламова Н. Ф., Силантьева М. М. (2011) Современное состояние и тенденции изменений климата Кулунды. *Известия Алтайского государственного университета*, 3–2: 50–55 [Kharlamova N. F., Silantyeva M. M. (2011) Current state and trends in climate change in the Kulunda. *Izvestiya of Altai State University* [Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta], 3–2: 50–55 (in Russian)]

Харюткина Е. В., Логинов С. В., Усова Е. И., Мартынова Ю. В., Пустовалов К. Н. (2019) Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков. *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2: 45–65 [Kharyutkina E. V., Loginov S. V., Usova E. I., Martynova Yu. V., Pustovalov K. N. (2019) Tendencies in changes of climate extremality in Western Siberia at the end of the XX century and the beginning of the XXI century. *Fundamental and Applied Climatology* [Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya], 2: 45–65 (in Russian)]

Хромов С. П., Мамонтова Л. И. (1974) *Метеорологический словарь*. Л., Гидрометеиздат, 568 с. [Khromov S. P., Mamontova L. I. (1974) *Meteorological dictionary*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 568 p. (in Russian)]

Шведов Ф. Н. (1892) Дерево, как летопись засух. *Метеорологический вестник*. Переиздание: *Дендроклиматохронология и радиоуглерод: материалы второго Всесоюзного совещания по дендрохронологии и дендроклиматологии* (1972) Каунас, с. 17–26 [Shvedov F. N. (1892) A tree as a chronicle of droughts. *Meteorological Bulletin*. Reissue: *Dendroclimatochronology and radiocarbon: materials of the Second All-Union Workshop on Dendrochronology and Dendroclimatology* (1972) Kaunas, p. 17–26 (in Russian)]

Шиятов С. Г. (1986) *Дендрохронология верхней границы леса на Урале*. М., Наука, 136 с. [Shiyatov S. G. (1986) *Dendrochronology of the upper timberline in the Urals*. Moscow, Nauka, 136 p. (in Russian)]

Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурзбаев М. М., Хантемиров Р. М. (2000) *Методы дендрохронологии*. Ч. I. Красноярск, Изд-во КрасГУ, 80 с. [Shiyatov S. G., Vaganov E. A., Kirdyanov A. V., Kruglov V. B., Mazepa V. S., Naurzbaev M. M., Khantemirov R. M. (2000) *Methods of dendrochronology*. Part 1. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University, 80 p. (in Russian)]

Шнитников А. В. (1957) *Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария*. Записки Географического Общества СССР, Новая серия, Т. 16. М.-Л., Издательство АН СССР, 338 с. [Shnitnikov A. V. (1957) *Variability of the general moisture content of the continents of the Northern Hemisphere*. Notes of the Geographical Society of the USSR, New series, Vol. 16. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR, 338 p. (in Russian)]

Adams H. R., Barnard H. R., Loomis A. K. (2014) Topography alters tree growth-climate relationships in a semi-arid forested catchment. *Ecosphere*, 5(11): 148

Agafonov L.I., Gurskaya M.A., Kukarskih V.V., Bubnov M.O., Devi N.M., Galimova A.A. (2021) Insular pine forests of the Southern Urals and ribbon pine forests of the Altai as objects of dendroclimatic research. *Russian Journal of Ecology*, 52(5): 349–357

Babushkina E. A., Belokopytova L. V. (2014) Climatic signal in radial increment of conifers in forest-steppe of Southern Siberia and its dependence on local growing conditions. *Russian Journal of Ecology*, 45(5): 325–332

Babushkina E. A., Zhirnova D. F., Belokopytova L. V., Tychkov I. I., Vaganov E. A., Krutovsky K. V. (2019) Response of four tree species to changing climate in a moisture-limited area of South Siberia. *Forests*, 10(11): 999

Bloomfield P. (2000) *Fourier analysis of time series: an introduction*. John Wiley & Sons Publ., 261 p.

Brückner E. (1890) Klimaschwankungen seit 1700: nebst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit. *Geographische Abhandlungen*, 4(2): 153–484 [Brückner E. (1890) Climate fluctuations since 1700: together with remarks on the climate fluctuations of the Diluvial period. *Geographical Treatises*, 4(2): 153–484 (in German)]

Cook E. R., Peters K. (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41: 45–53

Cook E. R., Kairiukstis L. (1990) *Methods of dendrochronology: applications in environmental sciences*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Acad. Publ., 394 p.

Chernogaeva G. M., Kuznetsova V. V., Kukhta A. E. (2020) Precipitation effects on the growth of boreal forest stands in the Volga Region. *Russian Meteorology and Hydrology*, 45(12): 851–857

Demina A. V., Belokopytova L. V., Andreev S. G., Kostyakova T. V., Babushkina E. A. (2017) Radial increment dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as an indicator of hydrothermal regime of the Western Transbaikalia forest steppe. *Contemporary Problems of Ecology*, 10(5): 476–487

Demina A. V., Belokopytova L. V., Zhirnova D. F., Mehrotra N., Shah S. K., Babushkina E. A., Vaganov E. A. (2022) Degree of connectivity in reconstructed precipitation dynamics and extremes for semiarid regions across South Siberia. *Dendrochronologia*, 71: 125903

Fritts H. C. (1976) *Tree rings and climate*. Academic Press, 567 p.

Kharlamova N. F. (2020) Climatic variability of the Kulunda steppe. *Kulunda: climate smart agriculture. innovations in landscape research*. Frühauf M., Guggenberger G., Meinel T., Theesfeld I., Lentz S. (eds.) Springer, Cham, p. 19–32

Kostyakova T. V., Touchan R., Babushkina E. A., Belokopytova L. V. (2018) Precipitation reconstruction for the Khakassia region, Siberia, from tree rings. *Holocene*, 28(3): 377–385

Matveev S. M., Chendev Y. G., Lupo A. R., Hubbart J. A., Timashchuk D. A. (2017) Climatic changes in the East-European forest-steppe and effects on Scots pine productivity. *Pure and Applied Geophysics*, 174(1): 427–443

Melvin T. M., Briffa K. R., Nicolussi K., Grabner M. (2007) Time-varying response smoothing. *Dendrochronologia*, 25(1): 65–69

Schweingruber F. H. (1983) *Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Bern, P. Haupt, 234 p. [Schweingruber F. H. (1983) *The tree ring: location, methodology, time, and climate in dendrochronology*. Bern, P. Haupt, 234 p. (in German)]

Tabakova M. A., Arzac A., Martínez E., Kirdyanov A. V. (2020) Climatic factors controlling *Pinus sylvestris* radial growth along a transect of increasing continentality in Southern Siberia. *Dendrochronologia*, 62: 125709

DOI 10.17516/1997-1389-0384

УДК 504.056:614.841(235.222)

Dendroindication of Past Fires in the Upper Reaches of the Aktru River (the Altai Mountains)

Svetlana A. Nikolaeva*, **Dmitry A. Savchuk**,
Alexander S. Kuznetsov and **Elena E. Timoshok**
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk, Russian Federation

Received 03.03.2022, received in revised form 23.05.2022, accepted 20.06.2022

Abstract. One of the factors in the transformation of forests in the Altai Mountains is fires, information about which is scarce and scattered. Therefore, indirect methods of dating the past fires are of great importance, and dendroindication methods are the most promising among them. The purpose of the study was dendroindication identification and dating of past fires in the forests in the upper reaches of the Aktru River (Severo-Chuisky Range, the Russian Altai Mountains). In this study, a set of dendroindication markers and the location of charcoals in the soil were used. Each marker had its own dating accuracy, from 1–2 years to several decades. Nevertheless, none of the markers, if it occurs singly, provides a reliably exact date of the fire event. When the same marker occurs repeatedly or different singly occurring markers appear simultaneously, the event can be considered more or less reliably dated. Forests in the upper reaches of the Aktru River are formed by Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) and Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.). No markers of past fires were found in the old-growth forests on the valley slopes and forests on fluvio-glacial deposits, with the exception of one old-growth Siberian stone pine forest. In post-fire forests, the dates of fires and the most probable fire periods of the past were established: 2012, 2008, 2003, 1974, 1970, 1933, 1923, the early 20th, late 19th, 18th, 17th, and the second half of the 16th centuries. Large-scale fires occurred at the end or in the second half of each of the last five centuries, i.e. once a century. Large-scale fires of 1974 and the late 19th century were primarily caused by the weather and climatic conditions of the growing seasons of the corresponding years. The results of the study on dating the past fires will be useful for assessing fire activity in the Altai Mountains – the region poorly studied in this regard.

© 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: sanikoll@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-1628-4883 (Savchuk D.); 0000-0002-5478-7385 (Kuznetsov A.); 0000-0001-7418-6336 (Timoshok E.)

Keywords: fire, dendroindication, dating, scar, tree ring, traumatic resin duct, charcoal, Siberian stone pine, Siberian larch, Altai Mountains.

Acknowledgements. The authors thank Dr. V. V. Davydov and Dr. S. G. Kopysov for material and advice on soil profiles and Dr. M. N. Belova for advice on vegetation cover. We also thank two anonymous reviewers, whose remarks and recommendations improved the manuscript. The study was supported by budget theme No. 121031300226–5, FWRG-2021–0003.

Citation: Nikolaeva S. A., Savchuk D. A., Kuznetsov A. S., Timoshok E. E. Dendroindication of past fires in the upper reaches of the Aktru River (the Altai Mountains). J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(2), 221–243. DOI: 10.17516/1997-1389-0384

Дендроиндикация прошлых пожаров в верховьях р. Актру (Горный Алтай)

С. А. Николаева, Д. А. Савчук,
А. С. Кузнецов, Е. Е. Тимошок

*Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН
Российская Федерация, Томск*

Аннотация. Одним из факторов преобразования лесов в Горном Алтае являются пожары, сведения о которых скудны и разрозненны. Поэтому важное значение приобретают косвенные методы датирования прошлых пожаров, среди которых наиболее перспективны дендроиндикационные. Цель исследования – дендроиндикационное выявление и датирование прошлых пожаров в лесах верховьев р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай). В исследовании был использован комплекс дендроиндикационных маркеров и расположение угольков в почве. Каждый маркер имел свою точность датирования от 1–2 лет до нескольких десятилетий. Но, тем не менее, ни один из маркеров, если он встречался единично, не давал гарантированно точную дату пожарного события. При массовой встречаемости одного и того же маркера или совпадении по времени разных единично встречающихся маркеров событие можно считать надежно датированным. Леса в верховьях р. Актру формируют кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) и лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). В старовозрастных лесах склонов долины и лесах на флювиогляциальных отложениях следы прошлых пожаров не обнаружены, за исключением одного старовозрастного кедровника. В пройденных пожарами лесах установлены даты пожаров и наиболее вероятных пожарных периодов прошлого: 2012, 2008, 2003, 1974, 1970, 1933, 1923 гг., начало XX в., конец XIX, XVIII, XVII вв., вторая половина XVI в. Периоды массовых пожаров соответствовали концу или второй половине каждого из последних пяти веков, т.е. периодичность крупных пожаров примерно раз в сто лет. Массовые пожары 1974 г. и конца XIX в. вызваны в первую очередь погодно-климатическими условиями. Полученные результаты по датированию прошлых

пожаров будут полезны для оценки пожарной активности на малоизученной в этом плане территории Горного Алтая.

Ключевые слова: пожар, дендроиндикация, датирование, травма, годовичные кольца, травматические смоляные ходы, древесные угольки, кедр, лиственница, Горный Алтай.

Благодарности. Авторы благодарят к.б.н. В. В. Давыдова за предоставленные полевые материалы по почвам, к.г.н. С. Г. Копысова за консультации по почвам, к.б.н. М. Н. Белову за консультации по напочвенному покрову. Также выражаем благодарность двум анонимным рецензентам, чьи замечания и советы способствовали улучшению статьи. Исследование выполнялось в рамках госбюджетной темы № 121031300226–5, FWRG-2021–0003.

Цитирование: Николаева, С. А. Дендроиндикация прошлых пожаров в верховьях р. Актру (Горный Алтай) / С. А. Николаева, Д. А. Савчук, А. С. Кузнецов, Е. Е. Тимошок // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 221–243. DOI: 10.17516/1997-1389-0384

Введение

Пожары являются одним из факторов, преобразующих экосистемы на протяжении тысячелетий. Недавнее потепление климата в экосистемах некоторых регионов считаются одной из причин увеличения их частоты и интенсивности (Falk et al., 2011; O'Connor et al., 2014 и др.). Горы служат ареной многих природных процессов, в том числе и пожаров, которые в районах с континентальным климатом обычное явление (Горчаковский, Шиятов, 1985). В Сибири большая часть исследований пожаров сосредоточена на территории равнинных лесов (см. обзор Цветков, Буряк, 2014 и др.). Например, на юге Западно-Сибирской равнины, и в Алтайском крае в частности, выявлена динамика распространения лесных пожаров и факторы, их вызывающие (Фураев, 1996; Парамонов и др., 2000; Фроленков, Фроленков, 2014; Kharuk et al., 2021).

Горные леса Алтая в этом плане изучены слабее. Здесь отмечались многочисленные гари в конце XIX и начале XX в., пожары в 1915 г. (Сапожников, 1949; Парамонов и др., 2000), а также угольки от сгоревшей древесины в почвах (Огородников, Читоркина,

2004). В целом, пожары в отдельных горных районах Алтая за последние 15–16 тысяч лет проходили регулярно, что подтверждается наличием микроугольков по всему профилю озерных отложений на Улаганском плато (Blyakharchuk et al., 2004). Косвенное свидетельство пожаров в лесах Горного Алтая в пределах лесного пояса – относительно небольшой возраст большинства их древостоев: 80–200, реже 250–300 лет (Парамонов и др., 2000; Бочаров, 2011; Бочаров, Савчук, 2015; Timoshok et al., 2020). Леса, древостои которых значительно старше (средний возраст первой генерации 410–620 лет), крайне немногочисленны. Это старовозрастные леса, сохранившиеся в долинах горно-ледниковых бассейнов Актру (Северо-Чуйский хребет) и Аккем (Катунский хребет), в районе Семинского перевала (Семинский хребет) (Бочаров, 2011; Николаева и др., 2015; Timoshok et al., 2020). Существенное воздействие огня на эти леса, по-видимому, отсутствовало в течение последних 4–6 столетий.

Для создания пожарных хронологий в горных лесах, которые были бы полезны в плане изучения цикличности и прогноза

пожаров, вышеприведенной информации недостаточно. Поэтому важное значение приобретают косвенные методы их датирования (Conedera et al., 2009; Lafon et al., 2017), среди которых наиболее перспективными являются дендроиндикационные (Шиятов и др., 2000; Falk et al., 2011; Guiterman et al., 2015). Верховья р. Актру, где проводятся многолетние комплексные экологические исследования, служат одним из модельных полигонов для изучения динамики пожаров. Свидетельства давних пожаров – обнаруженные здесь в 1898 г. гари с сохранившимися лиственницами и погибшими кедром (Сапожников, 1949), недавних – микрогольки в образцах из подстилки, мхов и лишайников (Бляхарчук и др., 2022).

Цель исследования – дендроиндикационное выявление и датирование прошлых пожаров в лесах верховьев р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай). При этом акцент будет сделан на методических проблемах использования дендроиндикационных маркеров.

Материалы и методы

Район и объекты исследования

Верховья р. Актру в пределах горноледникового бассейна площадью около 40 км² расположены на северном макросклоне Северо-Чуйского хребта (Горный Алтай). Склоны долины реки асимметричны: правый (северо-западный) более крутой и влажный, с многочисленными каменистыми осыпями, левый (юго-восточный) более пологий и сухой и, соответственно, более пожароопасный. Климат района, по данным ГМС Актру (50°04' с.ш., 87°45' в.д., 2150 м над ур.м., 1958–1994 гг.), характеризуется относительно низкими зимними (минус 17,2–18,6 °С) и летними (7,7–9,6 °С) температурами воздуха, годовыми суммами осадков около 550 мм и вы-

сокими амплитудами их колебаний по годам и сезонам. Эта территория относится к районам с низкой фактической горимостью (Рубцов и др., 2010; Kharuk et al., 2021) и низкой грозовой активностью (Дмитриев и др., 2011).

Предварительный анализ состава и структуры лесов в верховьях р. Актру (Тимошок и др., 2010; Николаева и др., 2015; Timoshok et al., 2016, 2020) показал, что они представлены: (1) фрагментами старовозрастных кедровых лесов, разделенных безлесными пространствами (осыпи и т.п.), сохранившихся ближе к ледникам, (2) сплошными массивами более молодых в основном лиственничных лесов, расположенных на склонах ниже по долине, (3) молодыми лиственничниками на флювиогляциальных отложениях дна долины, (4) формирующимися лесами на молодых моренах ледников на высотах 1990–2350 м над ур.м., а также (5) группами и одиночными деревьями в лесотундровом экотоне до высоты 2480 м.

Основные объекты исследования – пройденные пожарами леса и их гари. Для этого проанализированы (1) участки леса со следами пожаров в древесном и нижних ярусах (пожарные подсушины и нагар на деревьях, погибшие взрослые деревья и подрост, измененный видовой состав нижних ярусов) и их гари, и (2) почвы (31 почвенный и 3 геоморфологических разреза) на наличие слоев с видимыми невооруженным глазом древесными угольками и глубину их расположения. Характеристика пробных площадей (ПП), заложенных в пройденных пожарами лесах, представлена в табл. 1. Контролем служили пробные площади, заложенные в старовозрастных лесах, где следы прошлых пожаров не обнаружены (рис. 1).

Древостои пройденных пожарами лиственничных и кедровых лесов, произрастающих на склонах в нижней части горно-

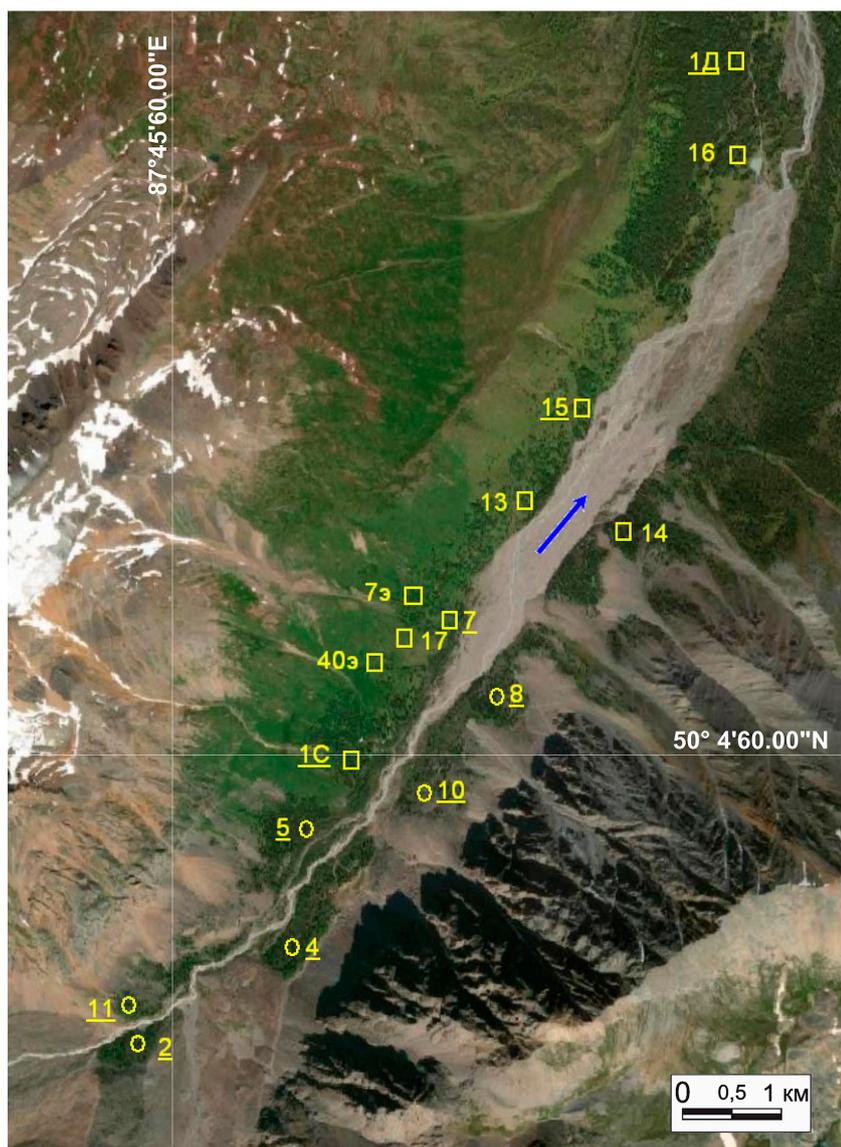


Рис. 1. Спутниковое изображение верховьев р. Актру. Указаны номера пробных площадей в старовозрастных (кружки) и пройденных пожарами (квадратики) лесах. Подчеркнутый номер пробной площади означает, что там имеются почвенные или геоморфологические разрезы. Не обозначены: ПП-5п (поврежденный пожаром фрагмент ПП-5), ПП-40Э-а, 40Э-б, 40Э-в (секции ПП-40Э)

Fig. 1. Satellite image of the upper reaches of the Aktru River with sampling areas. The numbers of the sampling areas in old-growth (circles) and post-fire (squares) forests are given. Underlined number of the sampling area indicates soil or geomorphic profile. Google Earth. Fire-disturbed section 5п of sampling area 5 and sections 40Э-а, 40Э-б, and 40Э-в of sampling area 40Э are not marked

ледникового бассейна Актру в пределах лесного пояса (рис. 1, ПП-7, 13, 14, 15, 16, 1Д), представлены 1–2 генерациями деревьев. Лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) обычно преобладает в первом ярусе,

а кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) встречается во втором, редко в первом, и преобладает в подросте. От самой старой генерации сохранились отдельные деревья лиственницы в возрасте 320–420 лет, кедра –

280. Средний возраст основной генерации деревьев 210–240 лет, подчиненной – 80–120. Древостои, расположенные в нижней части лесотундрового экотона (ПП-7Э, 40Э-б и 40Э-в (секции б, в на ПП-40Э), представлены одной генерацией деревьев в возрасте 50–80 лет. Здесь преобладает кедр. На недавних горях (ПП-5п – это сгоревший фрагмент ПП-5, 17, 40Э-а – секция а на ПП-40Э) сохранились единичные живые деревья и/или только обгоревшие пни и сухостойный подрост. В зависимости от состава и густоты древостоев количество и качество подроста варьировало от обильного хорошей жиз-

ненности (ПП-40Э-а, 40Э-в, 7, 17, 15, 16) или угнетенного (ПП-13, 14, 1С) до единичной встречаемости или его полного отсутствия (ПП-5п, 40Э-б, 7Э). В составе нижних ярусов отмечены виды-индикаторы пожаров – кипрей узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.) на недавних горях, вейник тупокословый (*Calamagrostis obtusata* Trin.) на более поздних этапах лесовосстановительного процесса, спирея извилистая (*Spirea flexuosa* Fisch. ex Camdess.) – в лесах, пройденных пожарами 100–150 лет назад. В почвах найдены один-три слоя с угольками (табл. 1).

Таблица 1. Краткая характеристика лесных сообществ в верховьях р. Актру

Table 1. Short characterization of forest communities in the upper reaches of the Aktru River

№ ПП	Высота над ур.м., м	Сообщество	Номер разреза и глубина слоя с угольками, см ¹
Юго-восточный (левый) склон			
5п	2200	гарь кедровника закустаренная разнотравно-кипрейная	–
1С	2170	кедровник разнотравно-зеленомошный (на конусе выноса селевого бассейна)	1 – (44–45), (61–84) 2 – (89–90), (126–175)
40Э-в	2260	кедровник кизильниково-разнотравный	–
40Э-а	2255	гарь кедровника разнотравно-кипрейно-вейниковая	–
40Э-б	2250	кедровник разнотравный	–
7Э	2300	кедровник разнотравно-злаковый	–
17	2200	гарь лиственничника разнотравно-вейниково-кипрейная	–
7	2170	лиственничник закустаренный зеленомошно-осочково-вейниковый	1 – нет 2 ² – (8–27)
13	2140	кедровый лиственничник закустаренный бруснично-осочково-разнотравный	–
15	2050	лиственничник вейниково-осочковый	1 – (0–11), (11–14)
16	2020	кедровый лиственничник зеленомошно-разнотравный	–
1Д	1980	лиственничник (за пределами горно-ледникового бассейна Актру)	1 – (0–26), (39–48), (48–63)
Северо-западный (правый) склон			
10	2190	Старовозрастный кедровник злаково-лишайниково-зеленомошный	1 – (6–20) 2 – (1–2) 3 ² – (4–10)
14	2050	лиственничный кедровник бруснично-зеленомошный	1 – (6–11)

Примечание: ¹ глубина слоя с угольками указана без толщины напочвенного покрова и слаборазложившейся подстилки; ² данные по: Копысов, 2011. Прочерк – данные отсутствуют.

Морфологическая и возрастная структура древостоев и динамика радиального прироста деревьев пройденных пожарами лесов сравнивались с таковыми старовозрастных лесов (контроль). Их древостои представлены несколькими (3–5) генерациями деревьев кедра и лиственницы (рис. 1, ПП-2, 4, 5, 8, 10, 11). Средний возраст самой старой генерации 410–530 лет. Под их пологом преобладает подрост кедра: при относительно высокой густоте древостоя он обилен и обычно угнетен, при невысокой – редкий и высокой жизненности. В почвах этих лесов (ПП-2, 4, 5, 8, 11) до 0,4–1,1 м глубины угольки не обнаружены, за исключением одного из кедровников (ПП-10).

В пройденных пожарами лесах заложено 11 пробных площадей (рис. 1, табл. 1). На каждой ПП проведен пересчет древостоя и подроста; отобраны живые деревья как без признаков, так и с признаками (пожарные подсушины, нагар) пожара, а также погибшие (сухостой, пни). Дополнительно использовались данные из сообществ, где обнаружены следы пожаров в почве: старовозрастной кедровник (ПП-10), кедровник в селевом бассейне (ПП-1С), лиственничник за пределами горно-ледникового бассейна Актру (ПП-1Д). У живых деревьев брались керны, у погибших – спилы или выпилы. Всего было взято 307 древесных образцов с 157 деревьев (табл. 2). Контролем для дендроиндикационного анализа служили деревья из старовозрастных лесов (ПП-4, 5). Для определения времени появления подроста кедра после пожара у 31 особи хорошей жизненности измерены приросты в высоту. Ширина годовых колец на древесных образцах измерялась на установке LINTAB с точностью 0,01 мм. Затем полученные ряды перекрестно датировались (Шиятов и др., 2000).

Для подтверждения времени прошлых пожаров и их связи с погодными условиями

использовались наблюдения очевидцев и метеоданные ГМС Актру (1958–1994 гг.).

Дендроиндикационные методы и маркеры

Для выявления и датирования прошлых пожаров применяли комплекс дендроиндикационных методов: травматические (маркеры – подсушины, шрамы, даты гибели деревьев), анатомические (косые и засмоленные кольца, травматические смоляные ходы), дендрометрические (резкие значительные и/или продолжительные изменения прироста ствола дерева по сравнению с приростами контрольных, отсутствующие кольца), возрастные (время появления новых генераций деревьев) (Горчаковский, Шиятов, 1985; Ваганов, Арбатская, 1996; Falk et al., 2011; Arbellay et al., 2014; Guiterman et al., 2015; Николаева, Савчук, 2020).

Пирогенные травмы – прямые свидетельства прошлых пожаров, среди которых в дендроиндикации чаще всего используются пожарные подсушины на стволах деревьев. Их наличие указывает на то, что воздействие тепловой энергии во время пожара привело к повреждению дерева, но не к его гибели, а сами пожары на этом участке были низкой и средней интенсивности (Falk et al., 2011). Поверхность пожарной подсушины имеет три зоны: (1) центральную без коры с оголенной древесиной, (2) боковую, заросшую новой древесиной и корой, (3) краевую с черной коркой, которая образовалась в год пожара (Горчаковский, Шиятов, 1985). Поскольку большая часть собранных древесных образцов представлена кернами, которые были взяты через все эти зоны, то обнаруженные на них травмы были разделены на две условные группы: к первой (подсушины) отнесены травмы на кернах, прошедших через первую и вторую зоны, ко второй (шрамы) – через

Таблица 2. Характеристика материала из лесных сообществ в верховьях р. Актру

Table 2. Characterization of materials from forest communities in the upper reaches of the Aktru River

№ ПП	Годы обследования	Количество		
		обследованных деревьев	древесных образцов	годовых колец в образцах
Юго-восточный (левый) склон				
5п	2017	4 (К, пни)	4	83–154
1С	2012, 2015, 2018	24 (К)	43	103–295
40Э-в	2018, 2021	1 (Л) 10 (К)	1 23	76 10–59
40Э-а	2018, 2021	8 (К, пни) 2 (К)	9 3	22–98 24–27
40Э-б	2018	4 (К)	8	39–73
7Э	1999	1 (Л) 6 (К)	1 15	23 16–42
17	2018	7 (Л, 3 пня) 6 (К)	11 12	32–264 25–31
7	2006, 2021	15 (Л) 2 (К)	30 4	51–277 97–117
13	2008, 2018	7 (Л) 9 (К)	13 20	142–214 43–100
15	2008, 2015, 2018	9 (Л) 1 (К)	18 2	76–184 80
16	2017	7 (Л) 4 (К)	14 9	78–300 57–109
Северо-западный (правый) склон				
10	2003	9 (К)	24	31–425
14	2008	14 (К) 7 (Л)	28 15	111–210 131–217
итого		157	307	
5 (контроль)	2003, 2018	5 (Л) 19 (К)	8 36	144–381 82–397
4 (контроль)	2006, 2018	16 (Л)	33	116–490

Примечание. ПП – пробная площадь, К – кедр, Л – лиственница.

третью зону. Шрамы – небольшие по площади изменения клеточной структуры, резко отличающиеся по цвету от окружающей древесины годовых колец. Положение шрамов (пожарное повреждение по: (Ваганов, Арбатская, 1996) в кольце, показывающее сроки прохождения пожара в течение сезона, систематизировано в (Ваганов, Арбатская, 1996).

Наличие *погибших деревьев и их остатков* (сухостой, валеж, пни) – один из внешних

маркеров пожаров. *Дата их гибели* часто используется для датирования пожаров (Горчаковский, Шиятов, 1985; Falk et al., 2011; Guiterman et al., 2015).

Травматические смоляные ходы – косвенный неспецифический маркер пожаров, который появляется у деревьев в результате механических, биологических и тепловых воздействий (Arbellay et al., 2014; Smith et al., 2016; DeRose et al., 2017 и др.). Они распола-

гаются упорядоченно в тангенциальном направлении. Эти структуры четко идентифицировались у лиственницы западной (*Larix occidentalis* Nutt.) и дугласии (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), не четко – у сосны желтой (*Pinus ponderosa* Douglas ex P. Lawson & C. Lawson). Время их появления варьировало от первого года после пожара у лиственницы до первых двух лет или даже на третий и пятый годы у дугласии (Margolis et al., 2007; Arbellay et al., 2014; Smith et al., 2016). Более детально этот маркер рассмотрен при датировании селей, лавин и обвалов. Такие ходы в виде тангенциальных рядов концентрируются в секторах ствола вокруг травмы у хвойных видов лиственница – *Larix decidua* Mill., ель – *Picea abies* (L.) H. Karst., пихта – *Abies alba* Mill.), но отсутствуют у видов рода сосна – *Pinus*. В зависимости от времени воздействия на дерево (в течение вегетационного сезона или в период покоя) такие ряды появляются в кольце в течение трех недель после него или в самом начале кольца следующего сезона вегетации соответственно. Но с увеличением осевого и тангенциального расстояния от места воздействия они могут «мигрировать» к более поздним участкам кольца и формироваться в течение нескольких лет после воздействия (см. обзор: (Николаева, Савчук, 2020).

Другие **морфо-анатомические маркеры**: (1) изменения прироста, а также (2) отсутствующие, (3) косые, (4) засмоленные кольца. Первые три маркера выявлялись при перекрестном датировании, когда сравнивались отдельные радиусы друг с другом и с контрольной хронологией. Все четыре маркера концентрировались около травмы (Горчаковский, Шиятов, 1985; Arbellay et al., 2014; Николаева, Савчук, 2020).

Анализ материала показал, что для датирования пожаров лучше подходят следующие

изменения прироста относительно контроля: (1) резкое и длительное его снижение, (2) эксцентричный рост, когда снижение прироста по одному радиусу дерева сопровождается его повышением по другому, (3) его кратковременное (1–2 года), но значительное снижение. Отсутствующие после воздействия кольца включали сгоревшие и/или выпавшие (не образовавшиеся из-за отсутствия камбия). Косые кольца – результат образования новой древесины в боковой части подсушины при зарастании травмы. На керне они имели непараллельные границы в тангенциальном направлении, на спиле – неконцентрические. Засмоленные кольца отличаются повышенным содержанием смолы в кольце. Визуально они выглядят как кольца коричневого цвета на фоне окружающей светлой древесины.

Время появления новых генераций деревьев – маркер, устанавливаемый при изучении возрастной структуры древостоев. При использовании последней для датирования пожаров необходимо: (1) определить возраст деревьев и (2) знать время заселения территории с достаточно высокой точностью, а также (3) собрать массовый материал древесных образцов. При быстром заселении территории после катастрофических пожаров это время, оцениваемое по массовому порослевому возобновлению лиственных пород, как маркер оказалось эффективным для датирования пожаров (Margolis et al., 2007; Guiterman et al., 2015; Lafon et al., 2017). При растянутом по времени заселении территории предлагается использовать возраст самых старых деревьев каждой новой генерации, но в горах это не всегда применимо при изучении возрастной структуры семенных древостоев (Горчаковский, Шиятов, 1985).

Наличие древесных угольков в почве и глубина их залегания. Формально этот маркер не является дендроиндикационным, хотя

позволяет устанавливать факт пожаров и приблизительно их датировать в отдаленном прошлом (Conedera et al., 2009; Lafon et al., 2017). Точность определения времени появления угольков в почвенных слоях невысока (обычно несколько сотен лет, редко – первая сотня по: (Conedera et al., 2009), как при определении радиоуглеродным методом, так и по скорости образования слоев гумуса. Последняя сильно колеблется не только в разных регионах и в разных типах почв (1–10 см/100 лет по: Геннадиев и др., 1987), но и в одних и тех же условиях (1,3–1,7 см/100 лет на границе средней и южной тайги по: (Докучаев, 1936). Учитывая более суровые условия среды в верховьях р. Актру, были приняты более низкие ее значения – 1 см/100 лет, по которым сделан расчет времени образования почвенных слоев с угольками. Далее, как предложили (Smirnova et al., 2018), оно сопоставлялось со временем появления генераций деревьев. Такие расчеты времени появления угольков в почвенных слоях по глубине их залегания возможны только для почв, формирующихся в основном под воздействием климата, и не применимы в случае дополнительного воздействия других факторов, характерных для гор, например схода селей.

Результаты и обсуждение

Особенности дендроиндикационных маркеров в верховьях р. Актру

Пирогенные травмы. Подсушина на кернях выглядела как прекратившая рост древесина, которая через ряд лет с отсутствующими кольцами могла быть продолжена новой древесиной. Ее цвет в районе подсушины был (1) серый в центре подсушины, (2) коричневый у засмоленных колец, (3) темно-коричневый у прикоровых колец, (4) черный у остатков прикорового кольца. Три последних случая, видимо, вызваны непосредствен-

ным воздействием повышенной температуры пламени на древесину. На кернях только в одном случае удалось четко зафиксировать положение шрама в середине ранней древесины. Кроме того, на кернях обнаружены пирогенные травмы ближе к сердцевине, которые отражают воздействие огня на молодые деревья. Они условно отнесены к шрамам.

На обследованных участках радиальный прирост деревьев с пирогенными травмами снижался в год пожара или в последующие 1–2 года. У взрослых деревьев лиственницы он обычно восстанавливался в течение одного-двух лет. У большинства молодых деревьев кедра и лиственницы прирост в районе пожарных подсушин сохранялся на низком уровне или кольца отсутствовали длительное время, а соседние годовичные кольца были сильно засмолены. В дальнейшем у некоторой части деревьев прирост резко увеличивался.

В старовозрастных лесах (ПП-2, 4, 5, 8, 10, 11) пирогенные травмы не найдены. В пройденных пожарами лесах зафиксировано 42 травмы (29 подсушин и 13 шрамов), 59 % которых пришлось на один из лиственничников (ПП-13), по времени 97 % травм – на 1971–2020 гг. и 38 % – на 1974 г. (рис. 2). Следует отметить, что в лиственничнике (ПП-13) даты прекращения роста ствола в районе пожарных подсушин в 1968, 1974–1976 гг. датировали пожары одного года – 1974. Точность датирования событий по шрамам составила 1 год, подсушинам 1–3 года, а при наличии сгоревших колец на керне снижалась до десятилетия и более.

Сухостойные деревья и даты их гибели. Анализ роста таких деревьев показал, что внешнее воздействие на дерево не всегда приводит к его гибели в тот же год. Они могут продолжать формировать кольца по всей окружности ствола или в отдельных его секторах еще 1–3 года, но величина прироста та-

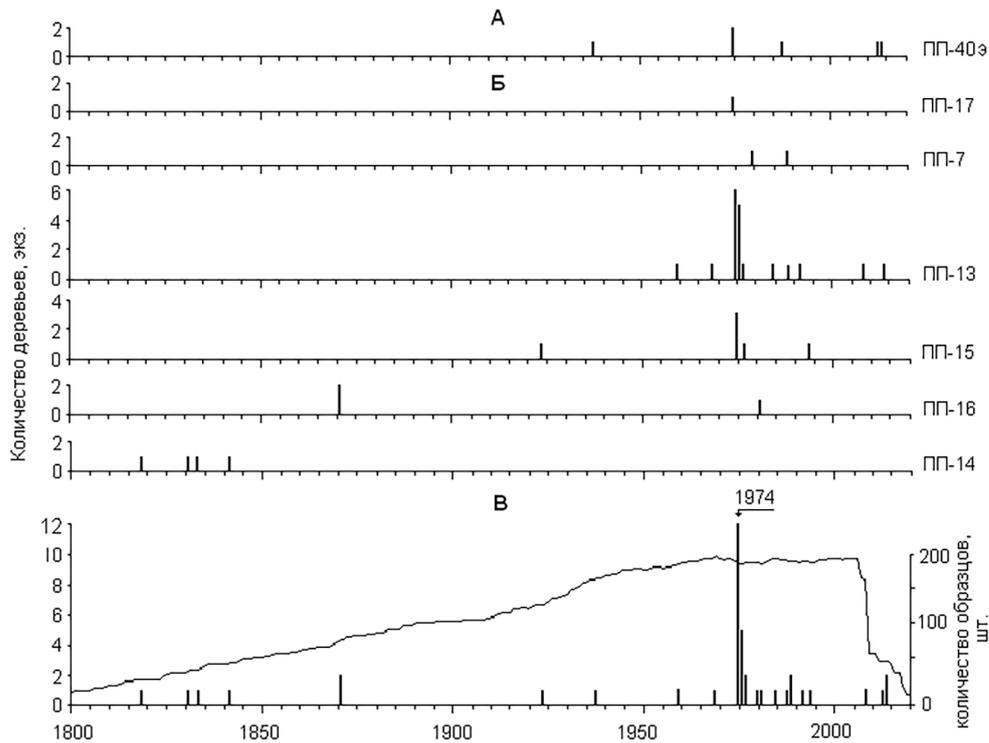


Рис. 2. Количество деревьев кедра и лиственницы с пирогенными травмами в пройденных пожарами лесах на верхней границе (А), в лесном поясе (Б) и по всем участкам леса (Б) в верховьях р. Актру. Шрам 1797 г. (ПП-13) не отражен на гистограмме. Стрелкой отмечен год наибольшего отклика деревьев (год события). Справа указаны номера пробных площадей

Fig. 2. Fire scars in Siberian stone pine and Siberian larch trees in post-fire forests at the upper tree line (A), in the forest belt (B), and at all sites (B) in the upper reaches of the Aktru River. The scar of 1797 (sampling area 13) is missing on the diagram. Arrow denotes the year of maximum tree response (the year of an event). Numbers of the sampling areas are indicated on the right side

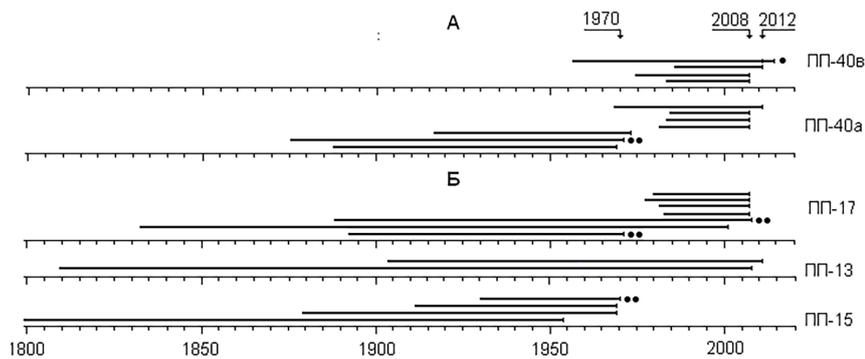


Рис. 3. Годы гибели деревьев в пройденных пожарами лесах на верхней границе (А) и в лесном поясе (Б) в верховьях р. Актру. Одним кружком отмечены деревья, которые продолжали после события образовывать годичные кольца только по одному радиусу, двумя – по двум измеренным радиусам древесины. Остальные обозначения см. на рис. 2

Fig. 3. Death dates of trees in post-fire forests at the upper tree line (A) and in the forest belt (B) in the upper reaches of the Aktru River. Trees that continued after the event to produce tree rings on one radius only are marked with one circle and on two measured radii with two circles. See Figure 2 for other notations

ких колец обычно резко падает. В таком случае дата прекращения роста таких деревьев будет на 1–3 года позже реальной даты события (рис. 3). Сухостойных взрослых деревьев на обследованных участках обычно сохранялось мало, т.к. они быстро вырубались на дрова, оставались только пни. В лесах, где пожары прошли 30–40 лет назад, у многих пней не было коры, а их древесина имела ту или иную степень разложения (ПП-7, 13, 15), на недавних гарях (до 10 лет) – еще и разную степень обгорания (ПП-5п, 17, 40Э-а, 40Э-в). На спилах пней без коры со слабо обгоревшим подкоровым слоем и малоразложившейся древесиной необгоревшие сектора имели на несколько подкоровых колец меньше по сравнению с обгоревшими. Поскольку обгоревшие кольца по времени соответствовали году пожара, установленному по другим маркерам, то кольца древесины с необгоревших секторов с течением времени, видимо, отпадали. На выпилах/спилах большинства сильно обгоревших пней (ПП-5п, 17, 40Э-а) ряды прироста одного дерева, легко синхронизировавшиеся друг с другом, не удалось синхронизировать с контрольной хронологией из-за их недостаточной длины. Следовательно, дата гибели деревьев со слабо обгоревшим подкоровым слоем древесины будет соответствовать времени пожара, а к деревьям с совсем необгоревшей (старые пни) или, наоборот, сильно обгоревшей древесиной следует относиться с осторожностью.

Молодые сухостойные деревья (подрост) массово отмечены на 10-летних гарях (ПП-17, 40Э-а, 40Э-в) и единично в лиственничниках (ПП-13, 15). Например, на близкорасположенных участках (гарь лиственничника ПП-17 и край кедровника ПП-40Э-а, 40Э-в) весь подрост погиб в 2008 г. (рис. 3). Через 10 лет (2018 г.) он был представлен стоящи-

ми, наклоненными и лежащими «гнездами» и одиночными экземплярами сухостойного кедра 1–3 м высотой. Сухостой взрослых и молодых деревьев диагностировал относительно недавно прошедшие пожары. Анализ прироста таких деревьев показал, что они в пределах одного участка леса прекращали рост в год воздействия (подчиненная часть древостоя, весь подрост) или еще через 1–2 года (деревья основного яруса). Даты прекращения роста многих деревьев – 2012, 2008 гг., по одному–трем деревьям – 2015, 2009, 2002, 1972, 1971, 1970, 1955 гг. При этом прекращение роста дерева в 2015 г. по одному радиусу и в 2008 г. по другому, а также деревьев в 2009, 2008 гг. датировали пожары 2008 г., а в 1972, 1971, 1970 гг. – 1970 г. Соответственно, точность датирования прошлых пожаров по погибшим деревьям подчиненной части древостоя и подросту составляла 1 год, по отдельным деревьям основного яруса – 1–3 года.

Ряды *травматических смоляных ходов* у деревьев лиственницы выглядят как цепь крупных полостей, расположенных параллельно границам кольца. Годичные кольца, несущие эти структуры, обычно встречались в древесине одиночно, но иногда в пяти кольцах подряд. У кедра как вида из р. *Pinus* эти структуры в виде тангенциальных рядов нами не обнаружены, но у молодых особей с хорошим приростом (3–10 мм в год) наблюдали увеличение количества крупных смоляных ходов в кольцах после воздействия.

Из 270 травматических смоляных ходов 93 % зафиксированы в четырех лиственничниках левого склона (ПП-7, 13, 15, 17). Отсутствие или незначительное их число отмечалось на участках леса: (1) с минимумом живых деревьев лиственницы (ПП-7Э, 17, 40Э-а, 40Э-в), (2) пространственная локализация которых препятствует распространению

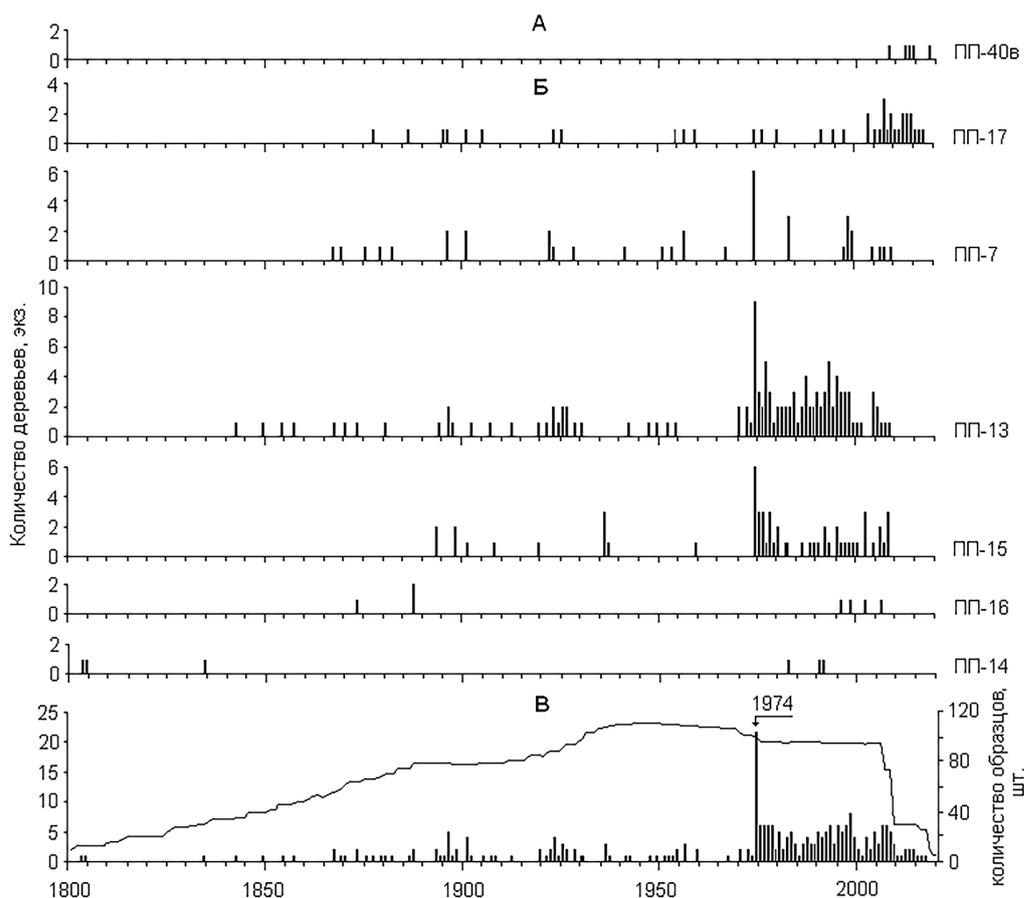


Рис. 4. Количество деревьев лиственницы с травматическими смоляными ходами в пройденных пожарами лесах на верхней границе (А), в лесном поясе (Б) и по всем участкам леса (В) в верховьях р. Актру. Остальные обозначения см. на рис. 2

Fig. 4. Tangential rows of traumatic resin ducts in Siberian larch trees of post-fire forests at the upper tree line (A), in the forest belt (B) and at all sites (B) in the upper reaches of the Aktru River. See Figure 2 for other notations

огня (более влажный склон – ПП-14, около небольшого озера и ручья – ПП-16), а также (3) в годы, плохо обеспеченные материалом (начало XIX в.). По времени 70 % таких ходов приходилось на 1971–2020 гг., среди которых четко фиксировался только 1974 (рис. 4). Такое их распределение указывает на достаточно сильное внешнее воздействие в 1974 г., после которого произошло, скорее всего, усиление защитных реакций древесных организмов в виде образования повышенного количества травматических смоляных ходов в последующие годы.

Травматические смоляные ходы появлялись у деревьев как в год пожара, так и в любой из двух последующих после воздействия лет. Изредка они встречались в течение 5–9 лет подряд. В годичном кольце они фиксировались в разных его зонах. Так, в одном из лиственничников (ПП-13) в 1974 г. эти ходы располагались в зонах с середины ранней древесины до конца поздней. Начало их появления в ранней древесине указывает на время пожарного события (середина июня–начало июля), в поздней – на известную их «миграцию» внутри кольца. Последняя зафиксиро-

вана не только у разных деревьев из одного древостоя, но и в кольцах одного года у одних и тех же особей.

Другие *морфо-анатомические маркеры* косвенные и включают резкие существенные и/или долговременные относительно контроля изменения прироста, а также отсутствующие, косые, засмоленные кольца. Эти маркеры вместе с вышеперечисленными в той или иной степени связаны друг с другом в плане их локализации на древесном образце.

Начало изменений прироста у деревьев наблюдали как в год пожара, так и 1–2 года спустя, их длительность доходила до 15–22 лет. Отсутствующие после воздействия кольца включали сгоревшие (от 0,5 до 12 колец) и/или выпавшие по одному или нескольким радиусам ствола. Кольца отсутствовали от 2–3 до 21–26 лет, а в центре незаросших подсушин – до 40–45 лет на момент обследования. Косые кольца древесины, формировавшиеся в дальнейшем, наблюдали 3–15 лет подряд. Они появлялись как на следующий год после травмы, так и спустя 1–2 десятилетия вслед за отсутствующими кольцами. Засмоленные кольца встречены в годичных кольцах как до, так и после пожара. Их количество обычно составляло 1–13 колец, у кедра изредка доходило до 33–50 подряд.

Все эти маркеры имеют неспецифический характер и свидетельствуют о факте какого-либо воздействия на дерево в определенный период времени. Использование совокупности этих маркеров в сочетании с другими вышеперечисленными позволили выявить некоторые события в прошлом либо с точностью до года, либо в довольно узком временном интервале.

Таким образом, за последнее 70 лет с помощью вышеперечисленных маркеров надежно и достоверно датированы четыре пожара. При этом наибольшая встречаемость травм,

смоляных ходов и изменений прироста пришлась на 1974 г., а дат гибели – на 1970, 2008, 2012 гг.

Время появления новых генераций деревьев. При дендроиндикации пожаров следует учитывать, что в верховьях р. Актру пройденные пожарами древостои представлены только двумя видами хвойных – кедром и лиственницей, которые возобновляются семенным путем и относительно медленно растут в первые годы жизни по сравнению с лиственными видами, особенно особями порослевого происхождения.

Для оценки времени появления новых генераций на отдельных участках склона количества обследованных деревьев оказывалось не всегда достаточно. Особенно это заметно на тех участках, где в недавнем прошлом прошли довольно сильные пожары (ПП-5п, 17, 40Э-а). Большая часть древостоя и весь подрост уничтожены, сохранились единичные взрослые деревья. Пни деревьев сильно обгорели и сохранность их древесины неудовлетворительная.

Возраст молодых особей восстанавливали по двум показателям – прирост по радиусу и в высоту. На участках леса с подростом хорошей жизненности (ПП-40Э-а, 40Э-в, 17, 7, 15, 16) он не превышал 40–50 лет, т.е. время его появления пришлось на 1970–1980-е гг. (рис. 5). На участках леса с преобладанием угнетенного подроста (ПП-13, 14) возраст не восстанавливался из-за очень низких значений прироста и плохо видимых границ околосердцевинных колец. Это не позволило использовать его для датирования пожаров. Возраст взрослых деревьев, входящих в состав древостоя, восстанавливали только по радиальному приросту. Использование данного подхода было затруднено из-за наличия гнили, варьирующей скорости роста древесины около сердцевины, а также неиз-

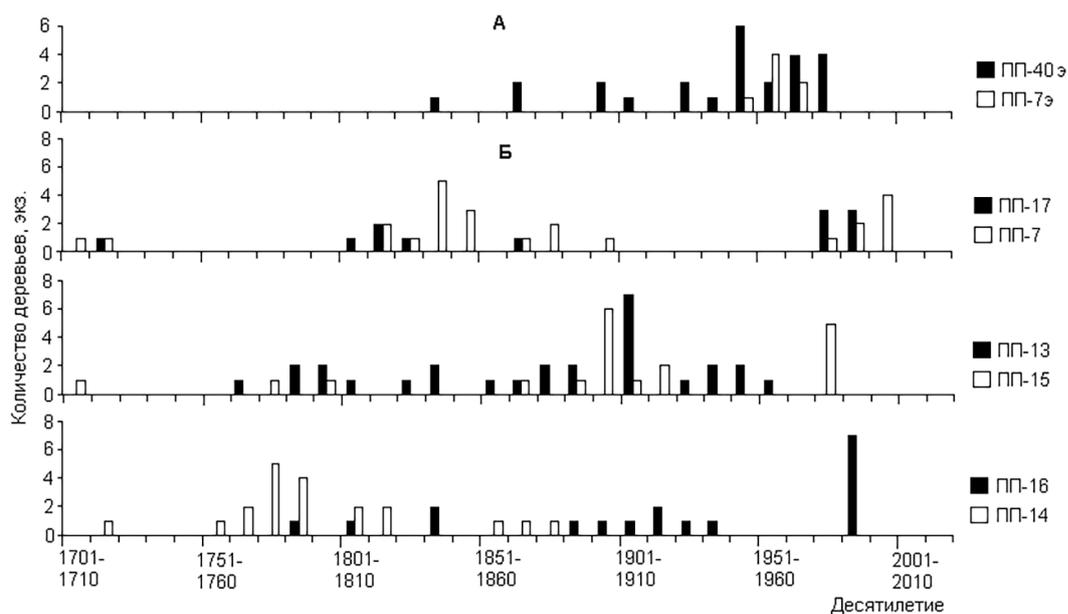


Рис. 5. Время появления модельных деревьев в пройденных пожарами лесах на верхней границе (А) и в лесном поясе (Б) в верховьях р. Актру. Остальные обозначения см. на рис. 2

Fig. 5. Tree establishing dates in post-fire forests at the upper tree line (A) and in the forest belt (B) in the upper reaches of the Aktru River. See Figure 2 for other notations

вестной скорости роста в высоту и по радиусу в первые десятилетия их жизни, соответствующие нижней части ствола ниже места отбора керна и приходящиеся на исторически отдаленные периоды времени. У деревьев в возрасте до 100–150 лет, как правило, гниль ствола отсутствовала, а керны можно было отобрать достаточно низко (на высоте 0,1–0,4 м). У деревьев старше 100–150 лет керны из-за наличия хорошо развитых лап, большого диаметра ствола и наличия гнили у сердцевины приходилось отбирать выше по стволу (до 1,1–1,7 м). Как следствие, точность определения возраста крупного хорошо растущего подроста составила 5–10 лет, 100–150-летних деревьев – 1–1,5 десятилетия, у деревьев старше 100–150 лет – 1–3 десятилетия и более.

Время заселения территории после пожара в горах может сильно затягиваться, но деревья, поселившиеся на гари в первые годы ее существования, обычно имеют сравнительно

хороший прирост в высоту и по радиусу (Горчаковский, Шиятов, 1985). Именно к таким хорошо растущим особям относился крупный подрост кедра, произрастающий под пологом леса или на микрополянах (ПП-40Э-а, 40Э-в, 17, 7, 15, 16). Время появления здесь самых взрослых особей подроста соответствовало первым годам после пожаров 1970 или 1974 гг. Аналогичная картина на гари кедровника (ПП-5п) после пожара 2003 г. В то же время обследование гари (ПП-17) в 2018 г., через 10 лет после пожара, показало отсутствие нового возобновления хвойных. Появлению всходов в первые годы после пожара, видимо, препятствовали крайне низкая урожайность кедра (2008, 2010, 2012 гг.) и лиственницы, быстро восстановившийся покров из крупных трав (разнотравно-вейниково-кипрейный) и повышенная сухость этого участка склона. Заселение этой территории, скорее всего, возможно после очередного пожара и урожайно-

го года, т.е. датировать пожар 2008 г. с точностью до десятилетия на данном участке в будущем будет затруднительно. Учитывая вышесказанное, точность датирования относительно недавних пожаров этим маркером в большинстве случаев составила 5–10 лет. Датировать пожары более отдаленного прошлого хотя бы с точностью до двух десятилетий оказалось проблематично, поскольку на фоне единично сохранившихся деревьев возросла неопределенность в оценке их возраста и времени заселения гарей.

В пройденных пожарами лесах лесного пояса по морфологической и возрастной структуре древостоев четко выделялись три группы деревьев: I – остатки материнского полога, деревья которого появились в 1700–1710-е гг., II – основной полог (1760–1940-е гг.), III – кедровый подрост (1970–1980-е гг.) (рис. 5Б). Время появления первых особей крупного подроста соответствовало двум близким по времени пожарам (1970 и 1974 гг.) и четко фиксировалось по отсутствию деревьев в предыдущие десятилетия и массовому появлению подроста кедра в 1970–1980-е гг. Времени появления деревьев бывшего материнского полога, скорее всего, предшествовали пожары во второй половине XVII в., но отсутствие деревьев более старшего возраста не позволяет проанализировать возрастную структуру ранее существовавших древостоев и наличие других маркеров. В лиственничнике (ПП-13) единственное дерево имеет шрам в 1797 г., т.е. дата получения этого шрама может соответствовать одному из пожаров этого периода. Но такие единичные деревья, получившие травму в молодом возрасте, ненадежны в плане датирования пожарных событий. Деревья основного полога появлялись на протяжении почти двух веков и представлены в этих древостоях одной или двумя возрастными генерациями. Всплески в их появлении

пришлись на 1780–1790-е (ПП-14), 1830–1840-е (ПП-7), 1890-е (ПП-15), 1900-е (ПП-13) гг. Свидетельства очевидца (Сапожников, 1949) и наличие других пожарных маркеров у деревьев позволяет говорить, что их появлению в 1890–1900-е гг. предшествовали пожары в 1880–1890-е. В остальных случаях других явных маркеров пожаров не обнаружено.

В кедровниках на верхней границе леса (ПП-40Э, 7Э) выделяется основной материнский полог и подрост. Подрост по времени начала появления (1970-е гг.) незначительно уступает самым молодым деревьям древостоя (1960-е гг.). Всплеск в появлении деревьев приходится на 1940–1970-е гг. (рис. 5А), но пожары в 1930–40-е гг., которые могли бы его вызвать, не подтверждены другими маркерами.

Древесные угольки в почве и глубина их залегания. В старовозрастных лесах (ПП-2, 4, 5, 8, 11, исключение – ПП-10) и сообществах, формирующихся на флювиогляциальных отложениях и моренах, судя по отсутствию угольков в почве до глубины 0,4–1,1, 0,2–0,7 и 0,1–0,4 м соответственно, пожары отсутствовали как минимум последние 1–2 тысячи лет.

В пройденных пожарами лесах, а также в одном из старовозрастных кедровников обнаружены один (ПП-7, 14), два (ПП-15, 1С), три (ПП-1Д, 10) слоя с угольками на разной глубине (табл. 1). Это свидетельствует (1) о том, что при пожаре горела древесина деревьев, а не только их хвоя и материал нижних ярусов леса (по: Lafon et al., 2017); (2) о прошлых пожарах на самом участке леса, а в двух случаях, когда угольки перемешаны с массой склоновых отложений, – выше по склону (нижний слой в двух разрезах ПП-1С и верхний слой – ПП-1Д) и (3) о разном времени наступления пожарных событий в прошлом.

Наличие угольков в слоях сразу под подстилкой и живым напочвенным покровом

говорит о сравнительно недавних пожарах (Smirnova et al., 2018), как, например, в лиственничнике (ПП-15). Скорее всего, это пожары 1970 и 1974 гг., поскольку отклик (по другим маркерам) деревьев на пожары 2008 и 2012 гг. очень слабый или не обнаружен. В другом лиственничнике (ПП-1Д) угольки, перемешанные с суглинком, указывают на такой же недавний по времени пожар, но на вышерасположенном участке склона.

На других участках лесов самые верхние слои с угольками расположены ниже: 1, 4 (ПП-10), 6 (ПП-10, 14), 8 (ПП-7) см, т.е. пожары были минимум 100, 400, 600, 800 лет назад соответственно. В пройденных пожарами лесах (ПП-7, 14) время этих событий (600 и 800 лет) намного больше времени существования самых старых деревьев, поэтому оценить предполагаемое время этих пожаров по возрасту деревьев невозможно. В старовозрастном кедровнике (ПП-10) разная глубина залегания слоев с угольками в трех почвенных разрезах свидетельствуют о прохождении пожаров примерно 100, 400 и 600 лет назад, а пространственное расположение разрезов – о локализации огня на очень небольших по площади, но недалеко друг от друга расположенных участках. Время появления трех основных генераций деревьев (1881–1940, 1631–1660, 1481–1550 гг.) на этих участках сопоставимо со временем пожаров (около 1900, 1600, 1400 гг.), рассчитанным по глубине расположения угольков.

На участках лесных сообществ, где в геоморфологических разрезах обнаружены селевые слои (пять на ПП-1С, один верхний на ПП-1Д), глубина залегания угольков не могла быть использована для оценки времени прошлых пожаров, за исключением расположенного под лесной подстилкой самого верхнего слоя (ПП-1Д). Выделенные слои в двух разрезах селевого конуса (ПП-1С)

имели стратиграфическое согласие. А время образования селевых и почвенных слоев установлены дендроиндикационным и радиоуглеродными методами (Николаева и др., 2017). Так, время образования верхнего слоя с угольками приходится на 1785–1813 гг., нижнего – ранее 1500 г.

Таким образом, наличие дендроиндикационного маркера у дерева в том или ином году, даже таких как подсушина, шрам и дата гибели, не позволяет с полной уверенностью утверждать, что именно в этом году было пожарное событие. Это объясняется влиянием факторов, связанных как (1) со степенью воздействия огня на отдельные деревья, (2) спецификой отклика разных их функциональных систем, выявляемого по разным маркерам, (3) внешним воздействием на уже погибшие особи, так и (4) с местом отбора древесного образца. В результате в момент обследования маркер может быть «сдвинут» как в прошлое от даты реального события из-за уничтожения годичных колец (сгоревшие, разрушенные и отслоившиеся после пожара), так и в будущее из-за отсроченного отклика разных функциональных систем дерева (маркеры – начало изменения прироста, прекращение роста в районе подсушины, гибель дерева, косые кольца, травматические смоляные ходы внутри сезона и по годам). Из-за этого точность датирования события для отдельных особей в некоторых случаях снижается до десятилетия. Часть маркеров увеличивают неопределенность датирования из-за проблем с точным определением возраста дерева и времени заселения территории (время появления дерева, возрастная структура древостоев) или из-за особенностей распространения смолы по древесине (засмоленные кольца). Совместный анализ глубины залегания древесных угольков в почве и возрастной структуры древостоев может оказаться пер-

спективным инструментом для датирования старых пожаров.

*Датирование пожаров
в верховьях р. Актру*

Датирование проводили, используя все маркеры одновременно. Так, практически все вышеперечисленные маркеры указывали на пожары в 2012, 2008, 1974 и 1970 гг., когда ими была охвачена часть лесов левого склона, а также один маркер (возраст подроста) – локальный пожар в 2003 г. в кедровнике (ПП-5п). Пожарами 2012 г. был полностью уничтожен значительный участок этого склона выше верхней границы леса, краем задев кедровник (ПП-40Э-а, 40 Э-в) и частично уничтожив взрослые деревья и подрост. На остальных участках воздействие пожаров этого года было более слабым, поскольку обнаружены в основном косвенные маркеры. Пожары 2008 гг. уничтожили большую часть деревьев подчиненной части древостоя и полностью подрост в лиственничнике (ПП-17), а также задели кедровник (ПП-40Э-а, 40Э-в), частично уничтожив взрослые деревья и подрост на них. На остальных участках воздействие пожаров этого года было более слабым. Пожары 1974 г. уничтожили или повредили часть деревьев и весь или почти весь подрост в лиственничниках левого склона (П-7, 13, 15, 16), снова частично задев кедровник (ПП-40Э-а, 40Э-в). Найден отклик (по приросту) молодых деревьев кедра на этот пожар и на правом склоне (ПП-10). Большинство маркеров четко указывали на пожар этого года – подсушины, шрамы, травматические смоляные ходы, резкие и долговременные изменения прироста, отсутствующие и сильно засмоленные кольца. Сухостой погибшего в этот год подрост практически не сохранился. По-видимому, он был уничтожен последующими пожарами. Пожар 1970 г. уничтожил или повредил

часть деревьев и весь подрост (ПП-17) или часть подрост (ПП-15) в лиственничниках. Наблюдения как очевидцев, так и наши собственные подтверждают пожары 2003 (кедровник ПП-5п) и 2012 гг. (лиственничник ПП-17 и деревья вверх по склону от него). Микроугольки (видимые при увеличении $\times 400$) во всех образцах подстилки, мхов и лишайников, собранные в июле 2012 г. в верховьях р. Актру (Бляхарчук и др., 2022), указывают на недавние по времени пожары – 2012, 2008 и, возможно, 2003 гг. В эти же годы леса горели на Семинском хребте (май 2003 г., Семинский перевал), и отдельные очаги их возгорания наблюдались вдоль Чуйского тракта (июль 2012 г.). По спутниковым наблюдениям (1996–2019 гг.) за пожарами в Сибири (Kharuk et al., 2021) в 2003, 2008, 2012 гг. были зафиксированы пики в количестве, в 2003, 2012 гг. – площади пожаров.

Среди этих пяти пожаров, если судить по встречаемости маркеров, пожар 1974 г. был самым крупным, охватив большую часть левого склона. На этот год и несколько последующих, если учитывать сдвиг отклика деревьев, приходится максимальное число травм (подсушины и шрамы), травматических смоляных ходов, резких и продолжительных снижений прироста. На 1974 г. приходится пожары, охватившие большие территории в южной тайге Западной и Средней Сибири (Фуряев, 1996) и в Алтайском крае (Фроленков, Фроленков, 2014). Большие по количеству и/или площади пожары в 1951, 1962, 1997, 1999, 2000, 2006, 2010 гг. в Алтайском крае (Фроленков, Фроленков, 2014), в 2001 г. в Горном Алтае (Дмитриев и др., 2011) и в 2011, 2014–2016, 2019 гг. в Сибири (Kharuk et al., 2021), по-видимому, не дошли до верховьев р. Актру или имели очень слабый отклик.

Надежность датирования более ранних по временной шкале пожарных событий

снизилась, т.к. уменьшилось количество древесных образцов и особенно встречаемость самих маркеров, в первую очередь прямых, из-за сердцевинной гнили ствола, недостатка деревьев старших возрастов, более поздних пожаров, уничтоживших следы предыдущих и т.п.

Локальные пожары в 1930-е гг. (вероятнее всего, в 1933 г.) идентифицировались в лиственничнике (ПП-16) и кедровнике (ПП-14) по массовым изменениям прироста, появлению шрама, засмолению и наличию косых колец у отдельных особей. Возможно, пожар этого года был в кедровнике (ПП-40Э), т.к. здесь в два последующих десятилетия (1940–1950-е гг.) наблюдался всплеск в появлении деревьев. На 1933 г. приходится пожары в южной тайге Западной Сибири (Фуряев, 1996). Еще один год с локальными пожарами (1923 г.) отмечен в двух лиственничниках (ПП-13, 15) и, возможно, еще в двух (ПП-17, 7). Его маркерами стали шрамы, косые кольца и повышенное количество травматических смоляных ходов. Локальный пожар в первое десятилетие XX в. отмечался на двух участках леса (ПП-13, 14) по косвенным маркерам (изменения прироста, наличие косых и засмоленных колец). Этому временному отрезку близки пожары 1915 г. в южной тайге Западной Сибири, дошедшие до Горного Алтая (Парамонов и др., 2000) и 1901, 1911, 1915 гг. в Средней Сибири (Фуряев, 1996).

Пожары конца XIX в. были наиболее вероятны в лесах в следующие временные интервалы: 1881–1895 (ПП-13, 15), 1887–1889 и 1870 (ПП-16), 1870–1875 (ПП-14), 1868–1871 (ПП-7), 1862–1872 гг. (ПП-13). Их маркеры – изменения прироста, в отдельных случаях шрамы, травматические смоляные ходы. Пожары конца XIX в. нашли отражение в повышенном количестве появившихся деревьев в двух лиственничниках (ПП-13, 15) и старо-

возрастном кедровнике (ПП-10). Последствия этих пожаров описаны В.В. Сапожниковым (1949), посетившим верховья р. Актру в 1898 г. В южной тайге Западной Сибири (Фуряев, 1996) наибольшие по площади пожары в это время были в 1870, 1876 гг.

Пожары конца XVIII в. были наиболее вероятны в следующие временные интервалы: 1796–1797 гг. (ПП-14), конец 1790-х (ПП-13), 1787–1788 (ПП-15), 1785–1813 (ПП-1С). Их маркеры – изменение или отсутствие прироста, шрам. Этому же времени соответствует наличие угольков в селевых отложениях (≈1800 г.) и появление деревьев основной генерации в кедровнике на селевом конусе (ПП-1С) (Николаева и др., 2017) и первых деревьев основной генерации в лиственничниках (ПП-17, 7).

Пожары конца XVII в. Их маркеры – остатки деревьев материнского полога в пройденных пожарами лесах (ПП-17, 7, 15, 14), появившиеся в 1710–1720-е гг.

Еще более давние пожары – вторая половина XVI в. Их маркеры – появление деревьев в кедровнике (ПП-10). Время появления угольков в почве кедровника на селевом конусе (ПП-1С) и старовозрастного кедровника (ПП-10), полученное по радиоуглеродному датированию (см.: Николаева и др., 2017) и скорости образования гумуса, оказалось близким: 1530–1570 гг. и ранее 1600 г. соответственно.

Сильные пожары часто связывают с засухами вследствие господства блокирующих антициклонов в атмосфере, с продолжительными (15–48 дней) периодами без дождей в течение пожароопасных сезонов (Фуряев, 1996; Цветков, Буряк, 2014). В 1974 г. сформировались все условия для возникновения и развития массовых пожаров. Год отличался малоснежной зимой, очень сухим и жарким летом (снега на 23 %, а дождей на 51 %

меньше, летняя температура на 1,5–2 °С выше по сравнению с многолетними значениями соответственно). Кроме того, на большинстве лесных участков за предыдущий длительный беспожарный период, по-видимому, накопился горючий материал. Метеорологические условия других лет с пожарами (1970, 2003, 2008, 2012 гг.) были менее напряженными. Благоприятные условия для возникновения пожаров в эти годы наблюдались либо в отдельные месяцы, либо в течение всего лета, но по одному параметру. В Сибири (Kharuk et al., 2021) пожары 2003, 2012 гг. совпали с экстремальными температурами июля. Пожары в конце XIX в. в верховьях р. Актру соответствуют периодам потеплений, выявленным по динамике хода реконструированной летней температуры (Timoshok et al., 2016), которые, скорее всего, сопровождались длительными засушливыми периодами. Учитывая вышесказанное, можно с уверенностью утверждать, что крупные пожары 1974 г. и конца XIX в., охватившие большие территории Сибири, в том числе верховья р. Актру, были вызваны экстремальными погодноклиматическими изменениями.

Заключение

В этом исследовании был проверен ряд дендроиндикационных маркеров на пригодность датирования пожаров в верховьях р. Актру: пирогенные травмы ствола (подсушины, шрамы), даты гибели деревьев, отсутствующие, косые и засмоленные кольца, травматические смоляные ходы, существенные и/или продолжительные изменения прироста ствола деревьев по сравнению с контрольными, время появления новых генераций деревьев

по их восстановленному возрасту, а также глубина расположения древесных угольков в почве.

Каждый маркер имеет свою точность датирования от 1 года до нескольких десятилетий и глубину датирования от нескольких десятилетий до нескольких столетий. Но, тем не менее, ни один из маркеров, если он встречается единично, не может дать точную дату пожарного события. Причинами являются: (1) естественная потеря годичных колец с маркерами, (2) отстроченный отклик дерева на событие, (3) ошибки в определении возраста дерева и времени послепожарного заселения территории. При массовой встречаемости одного и того же маркера или совпадении по времени разных единично встречающихся маркеров событие можно считать надежно датированным.

В верховьях р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай) в старовозрастных лесах, в формирующихся лесах на флювиогляциальных отложениях и на молодых моренах ледников следы прошлых пожаров не обнаружены, за исключением одного старовозрастного кедровника. В пройденных пожарами кедровых и лиственничных лесах установлены даты пожаров и наиболее вероятных пожарных периодов прошлого: 2012, 2008, 2003, 1974, 1970, 1933, 1923 гг., начало XX в., конец XIX, XVIII, XVII вв., вторая половина XVI в. Периоды массовых пожаров соответствовали концу или второй половине каждого из последних пяти веков, т.е. примерно раз в столет. Полученные результаты по датированию прошлых пожаров будут полезны для оценки периодичности пожаров на малоизученной в этом плане территории Горного Алтая.

Список литературы / References

Бляхарчук Т. А., Николаева С. А., Долгих Н. М. (2022) Изменение состава пыльцевых спектров вдоль высотного профиля в бассейне р. Актру (Центральный Алтай). *Геосферные ис-*

следования, в печати [Blyakharchuk T. A., Nikolaeva S. A., Dolgikh N. M. (2022) Change of pollen spectrum content along altitudinal transect in the Aktru river basin (the central Altai mountains). *Geosphere Research*, in press (in Russian)]

Бочаров А. Ю. (2011) *Высокогорные леса Центрального Алтая. Таксационная структура и радиальный рост*. Saabruken, LAP Lambert Academic Publ., 212 с. [Bocharov A. Yu. (2011) *High-mountain forests in the central Altai Mountains. Taxation structure and radial growth*. Saabruken, LAP Lambert Academic Publ., 212 p. (in Russian)]

Бочаров А. Ю., Савчук Д. А. (2015) *Larix sibirica* (Pinaceae) на верхней и нижней границах своего произрастания (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай). *Растительный мир Азиатской России*, 3: 22–29 [Bocharov A. Yu., Savchuk D. A. (2015) *Larix sibirica* (Pinaceae) at the upper and lower forest lines (the Severo-Chuisky Ranges, the Altai Mountains). *Flora and Vegetation of Asian Russia* [Rastitelnyi mir Aziatskoï Rossii], 3(19): 22–29 (in Russian)]

Ваганов Е. А., Арбатская М. К. (1996) История климата и частота пожаров в центральной части Красноярского края. 1. Климатические условия сезона роста и распределение пожаров в сезоне. *Сибирский экологический журнал*, 1: 9–18 [Vaganov E. A., Arbatskaya M. K. (1996) Climate history and fire frequency in central Krasnoyarsk Krai. 1. Climatic conditions of growth season and fire distribution in the season. *Siberian Ecological Journal* [Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal], 1: 9–18 (in Russian)]

Геннадиев А. Н., Пацукевич З. В., Герасимова М. И. (1987) Скорость почвообразования и допустимые нормы эрозии почв. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, 3: 31–37 [Gennadiyev A. N., Patsukevich Z. V., Gerasimova M. I. (1987) Soil-forming rate and admissible norms of soil erosion. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography* [Vestnik Moskovskogo universiteta. Seria 5. Geografia], 3: 31–37 (in Russian)]

Горчаковский П. Л., Шиятов С. Г. (1985) *Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях*. М., Наука, 209 с. [Gorchakovskiy P. L., Shiyatov S. G. (1985) *Phytoindication of environmental conditions and nature processes in high altitude mountains*. Moscow, Nauka, 209 p. (in Russian)]

Дмитриев А. Н., Кречетова С. Ю., Кочеева Н. А. (2011) *Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай*. Горно-Алтайск, Изд-во ГАГУ, 154 с. [Dmitriev A. N., Krechetova S. Yu., Kochееva N. A. (2011) *Thunderstorm and lightning forest fires in Altai Republic*. Gorno-Altai, Gorno-Altai State University, 154 p. (in Russian)]

Докучаев В. В. (1936) *Русский чернозем*. М.-Л., Сельхозгиз, 551 с. [Dokuchaev V. V. (1936) *Russian black earth*. Moscow-Leningrad, Selkhozgiz, 551 p. (in Russian)]

Копысов С. Г. (2011) *Ландшафтная гидрология геосистем лесного пояса Центрального Алтая*. Saabruken, LAP Lambert Academic Publ., 160 с. [Kopysov S. G. (2011) *Landscape hydrology of geosystems of the forest belt in the central Altai Mountains*. Saabruken, LAP Lambert Academic Publ., 160 p. (in Russian)]

Николаева С. А., Савчук Д. А. (2020) Методы дендроиндикации экзогенных гравитационных процессов: обзор. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 84(3): 441–450 [Nikolaeva S. A., Savchuk D. A. (2020) Methods of dendroindication of developing rapid geomorphic processes: an overview. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 84(3): 441–450 (in Russian)]

Николаева С. А., Савчук Д. А., Бочаров А. Ю. (2015) Влияние различных факторов на прирост деревьев *Pinus sibirica* в высокогорных лесах Центрального Алтая. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, 8(3): 299–318 [Nikolaeva S. A., Savchuk D. A., Bocharov A. Yu. (2015) Influence of different factors on tree growth of *Pinus sibirica* in the highlands of the central Altai Mountains. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 8(3): 299–318 (in Russian)]

Николаева С. А., Савчук Д. А., Кузнецов А. С. (2017) Датирование селевой активности в горно-ледниковом бассейне Актру (Горный Алтай). *ГеоРиск*, 2: 62–69 [Nikolaeva S. A., Savchuk D. A., Kuznetsov A. S. (2017) Dating of debris flow activity in the Aktru mountain glacial basin (the Altai Mountains). *Georisk*, 2: 62–69 (in Russian)]

Огородников А. В., Читоркина О. Ю. (2004) *Почвообразование в кедровых лесах Горного Алтая*. Томск, Издательство Томского государственного университета, 176 с. [Ogorodnikov A. V., Chitorkina O. Yu. (2004) *Soil formation in Siberian stone pine forests in the Altai Mountains*. Tomsk, Tomsk State University, 160 p. (in Russian)]

Парамонов Е. Г., Ишутин Я. Н., Саета В. А., Ключников М. В., Маленко А. А. (2000) *Лесовосстановление на Алтае*. Барнаул, 312 с. [Paramonov E. G., Ishutin Ya. N., Saeta V. A., Klyuchnikov M. V., Malenko A. A. (2000) *Reforestation in Altai*. Barnaul, 312 p. (in Russian)]

Рубцов А. В., Сухинин А. И., Ваганов Е. А. (2010) Классификация территории Сибири по фактической горимости с использованием спутниковых данных. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, 3(1): 30–39 [Rubtsov A. V., Sukhinin A. I., Vaganov E. A. (2010) Actual fire danger classification of the Siberian territories using satellite data. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 3(1): 30–39 (in Russian)]

Сапожников В. В. (1949) *По Русскому и Монгольскому Алтаю*. М., Государственное издательство географической литературы, 578 с. [Sapozhnikov V. V. (1949) *Along the Russian and Mongolian Altai*. Moscow, State Publishing House of Geographical Literature, 578 p. (in Russian)]

Тимошок Е. Е., Скороходов С. Н., Тимошок Е. Н. (2010) Флора высокогорных лесов верховий р. Актру (Северо-Чуйский хребет, Центральный Алтай). *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, 3(4): 351–371 [Timoshok E. E., Skorokhodov S. N., Timoshok E. N. (2010) Flora of high-mountain forests of Actru river sources (Severo-Chuisky Range, Centralny Altai). *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 3(4): 351–371 (in Russian)]

Фроленков И. М., Фроленков О. М. (2014) Динамика распространения лесных пожаров в Алтайском крае. *Мир науки, культуры, образования*, 1: 394–397 [Frolenkov I. M., Frolenkov O. M. (2014) Dynamics of distribution of forest fires in the Altai region. *World of Science, Culture, and Education* [Mir nauki, kultury, obrazovaniya], 1: 394–397 (in Russian)]

Фуряев В. В. (1996) Периоды высокой горимости и их роль в лесообразовательном процессе. *Сибирский экологический журнал*, 1: 67–71 [Furyaev V. V. (1996) Fire periods and their role in the forest formation process. *Siberian Ecological Journal* [Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal], 1: 67–71 (in Russian)]

Цветков П. А., Буряк Л. В. (2014) Исследования природы пожаров в лесах Сибири. *Сибирский лесной журнал*, 3: 25–42 [Tsvetkov P. A., Buryak L. V. (2014) Studies of fire nature in the forests of Siberia. *Siberian Journal of Forest Science* [Sibirskii lesnoi zhurnal], 3: 25–42 (in Russian)]

Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурызбаев М. М., Хантемиров Р. М. (2000) *Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор*

и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск, Изд-во КрасГУ, 80 с. [Shiyatov S. G., Vaganov E. A., Kirilyanov A. V., Kruglov V. B., Mazepa V. S., Naurzbaev M. M., Khantemirov R. M. (2000) *Methods of dendrochronology. Part 1. Fundamentals of dendrochronology. Collection and receipt of tree ring information*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University, 80 p. (in Russian)]

Arbellay E., Stoffel M., Sutherland E. K., Smith K. T., Falk D. A. (2014) Resin duct size and density as ecophysiological traits in fire scars of *Pseudotsuga menziesii* and *Larix occidentalis*. *Annals of Botany*, 114(5): 973–980

Blyakharchuk T. A., Wright H. E., Borodavko P. S., van der Knaap W. O., Ammann B. (2004) Late Glacial and Holocene vegetational changes on the Ulagan high-mountain plateau, Altai Mountains, southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209(1–4): 259–279

Conedera M., Tinner W., Neff C., Meurer M., Dickens A. F., Krebs P. (2009) Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews*, 28(5–6): 555–576

DeRose R. J., Bekker M. F., Long J. N. (2017) Traumatic resin ducts as indicators of bark beetle outbreaks. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(9): 1168–1174

Falk D. A., Heyerdahl E. K., Brown P. M., Farris C., Fule P. Z., McKenzie D., Swetnam T. W., Taylor A. H., Van Horne M. L. (2011) Multi-scale controls of historical forest-fire regimes: new insights from fire-scar networks. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(8): 446–454

Guiterman C. H., Margolis E. Q., Swetnam T. W. (2015) Dendroecological methods for reconstructing high-severity fire in pine-oak forests. *Tree-Ring Research*, 71(2): 67–77

Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. (2021) Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 50(11): 1953–1974

Lafon C. W., Naito A. T., Grissino-Mayer H. D., Horn S. P., Waldrop T. A. (2017) *Fire history of the Appalachian region: a review and synthesis. General Technical Report SRS-219*. Asheville, NC, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, 97 p.

Margolis E. Q., Swetnam T. W., Allen C. D. (2007) A stand-replacing fire history in upper montane forests of the southern Rocky Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(11): 2227–2241

O'Connor C. D., Falk D. A., Lynch A. M., Swetnam T. W. (2014) Fire severity, size, and climate associations diverge from historical precedent along an ecological gradient in the Pinaleno Mountains, Arizona, USA. *Forest Ecology and Management*, 329: 264–278

Smirnova O. V., Bobrovsky M. V., Khanina L. G., Smirnov V. E., Glukhova E. M. (2018) Old-growth spruce-fir forests in the plain area of the Komi Republic. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 3(4): 1–27

Smith K. T., Arbellay E., Falk D. A., Sutherland E. K. (2016) Macroanatomy and compartmentalization of recent fire scars in three North American conifers. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(4): 535–542

Timoshok E. E., Timoshok E. N., Gureyeva I. I. (2020) Ecological and cenotic features of the old-growth *Pinus sibirica* forests in the North-Chuya glaciation center, Russian Altai. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10(6): 291–298

Timoshok E. E., Timoshok E. N., Nikolaeva S. A., Savchuk D. A., Filimonova E. O., Skorokhodov S. N., Bocharov A. Yu. (2016) Monitoring of high-altitude terrestrial ecosystems in the Altai Mountains. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 48(1): 012008

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 № FUUU-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.)

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 (VI). Работа выполнена с целью выявить климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях по ширине годичного кольца и по VI 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 VI 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 VI 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 VI. Реконструкции температуры можно выполнять по обоим параметрам, но при использовании VI 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 (Dolgoва, 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 Фенноскандии 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 (керы) 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,

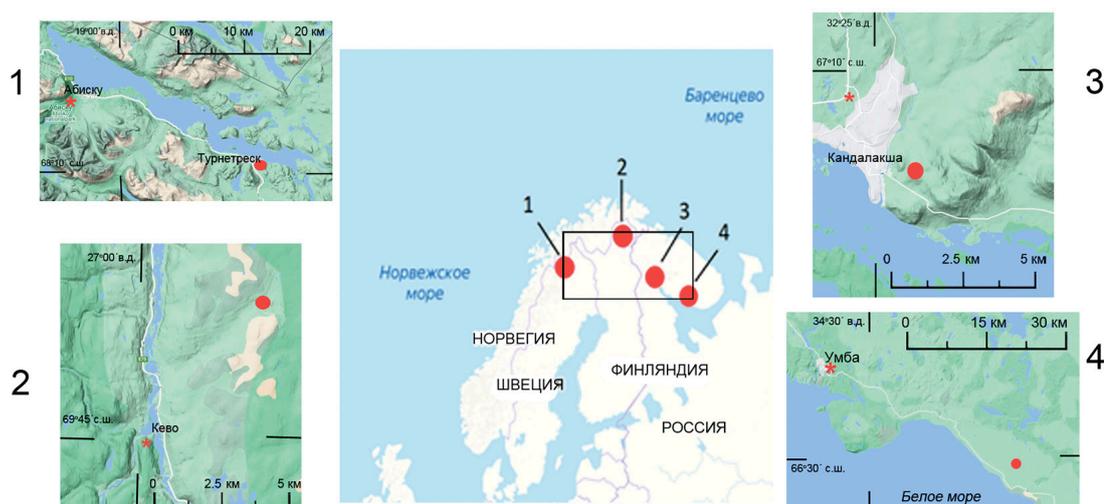


Рис. 1. Район исследования. 1, 2, 3, 4 [●] – точки сбора образцов. «*» метеостанция. Черная рамка – район, используемый для получения данных по CRU 4.04

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 COFESHA (Holmes, 1983). После установления календарной даты формирования колец на исходном сканированном изображении определяли ВІ.

Основываясь на качестве полученных сканированных изображений и результатов оценки ВІ, 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 ВІ 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 ВІ, 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 ВІ 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 ($68^{\circ}35' \text{с.ш.}$

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

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).

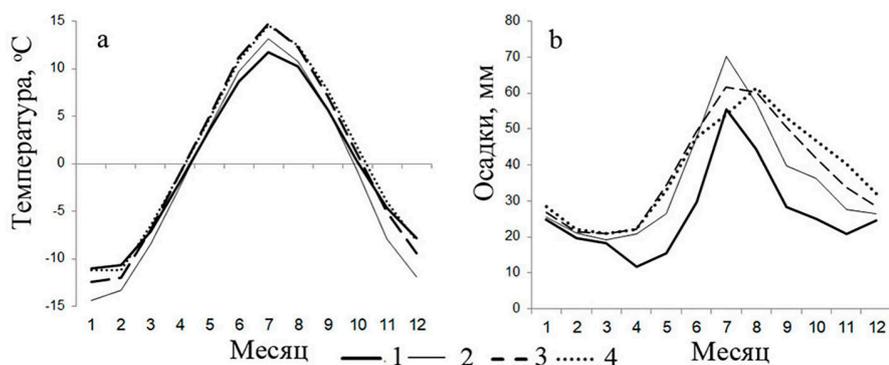


Рис. 2. Климатические условия района исследования: а – сравнение годового хода температуры; б – сравнение динамики осадков: 1, 2, 3, 4 – точки сбора образцов

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

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).

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 °С (точка 1) до минус 14 °С (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 ВІ 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 ВІ

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

Точка	Число образцов	Период	Длина, лет	Выпавшие, %	Ширина годичного кольца				ВІ 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

Точки	Ширина годичного кольца				Точки	Интенсивность отражения синего			
	1	2	3	4		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 ($r=0,3$, $N=230$, $p\text{-level}<0,05$). В большинстве случаев кросс-корреляция между хронологиями по ВІ несколько выше, чем по ширине годичного кольца (за исключением коэффициента корреляции между точками 3 и 4). Корреляция между индексами радиального прироста и ВІ 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 ВІ 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 ВІ имеют устойчивые связи с большим 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			
	Минимальный	ранг	Максимальный	ранг	Минимальные	ранг	Максимальные	ранг
1	1833–1841	1	1842–1855	1	1825–1841	1	1841–1848	1
	1898–1913	2	1919–1947	2	1885–1894	2	1931–1941	2
	1978–1997	3	1997–2004	3	1958–1969	3	2002–2009	3
2	1830–1843	2	1843–1865	2	1827–1843	2	1843–1889	1
	1876–1895	3	1917–1935	1	1897–1915	1	1916–1948	2
	1899–1917	1	1990–2007	3	1960–1970	3	1970–1977	3
3	1850–1868	3	1894–1899	3	1830–1840	2	1840–1861	1
	1900–1913	2	1945–1960	1	1862–1893	3	1925–1961	2
	1925–1944	1	1996–006	2	1897–1912	1	1985–1992	3
4	1834–1840	1	1850–1856	1	1834–1840	1	1848–1857	1
	1887–1903	2	1870–1887	3	1868–1875	2	1913–1934	2
	1976–2009	3	1914–1934	2	1976–2003	3	1971–1976	3

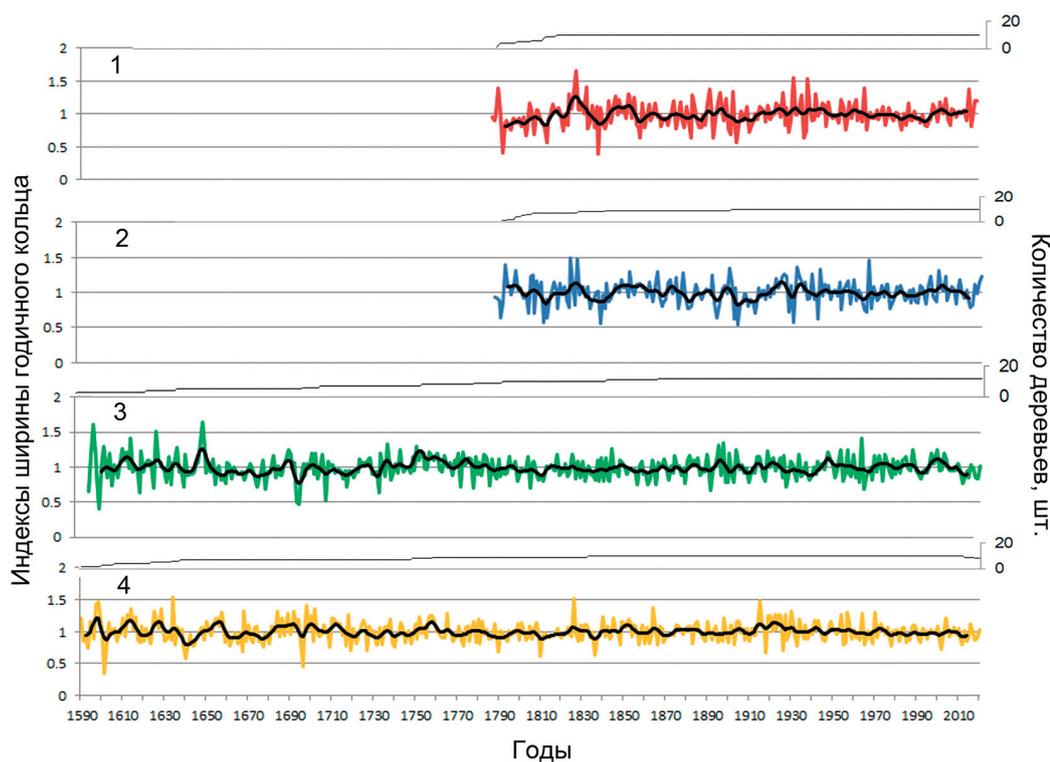


Рис. 3. Индексированные хронологии по ширине годичных колец и количество деревьев, использованных для создания хронологий. 1, 2, 3, 4 – точки сбора образцов. Черная жирная линия – 11-летнее сглаженное среднее

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

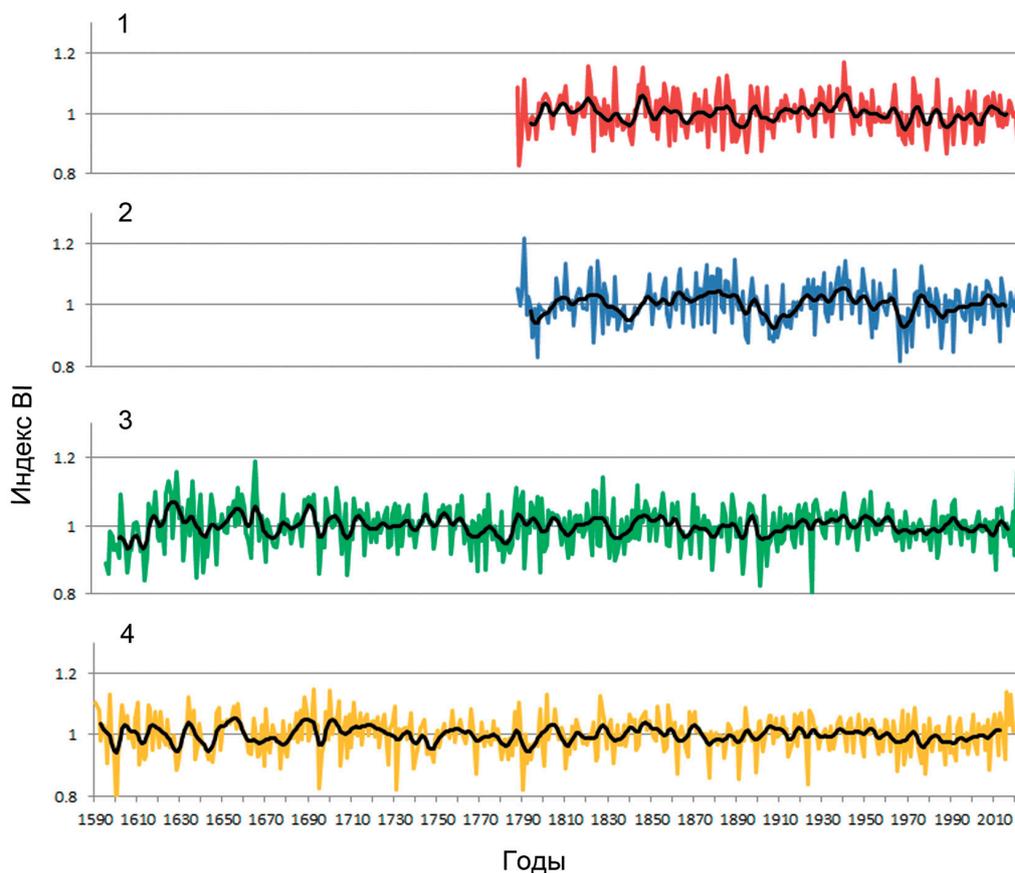


Рис. 4. Индексированные хронологии по ВІ. 1, 2, 3, 4 – точки сбора образцов. Черная жирная линия – 11-летнее сглаженное среднее

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 ВІ, 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 ВІ – 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 ВІ ($SD=0,72$).

На основе полученных связей была проведена реконструкция температуры июля по ширине годичного кольца и июня-августа по ВІ (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 ВІ, оказались гораздо более

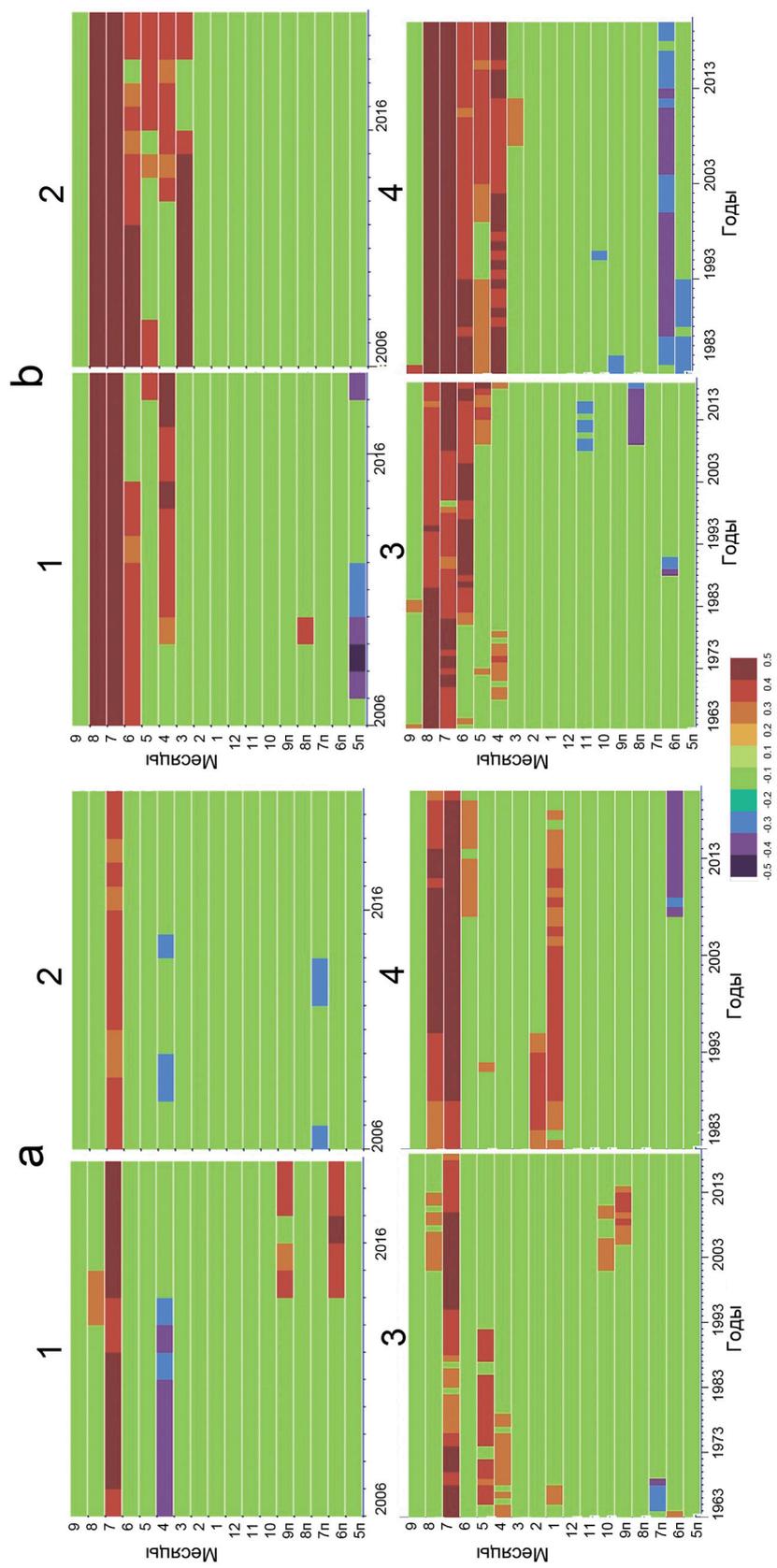


Рис. 5. Коэффициенты корреляции между индексами ширины годичного кольца (а), BI (b) и температуры воздуха по данным близлежащих метеостанций, рассчитанные методом скользящего окна размером 40 лет, с шагом в один год. «п» – месяцы предшествующего года. 1, 2, 3, 4 – точки сбора образцов. Оттенки зеленого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

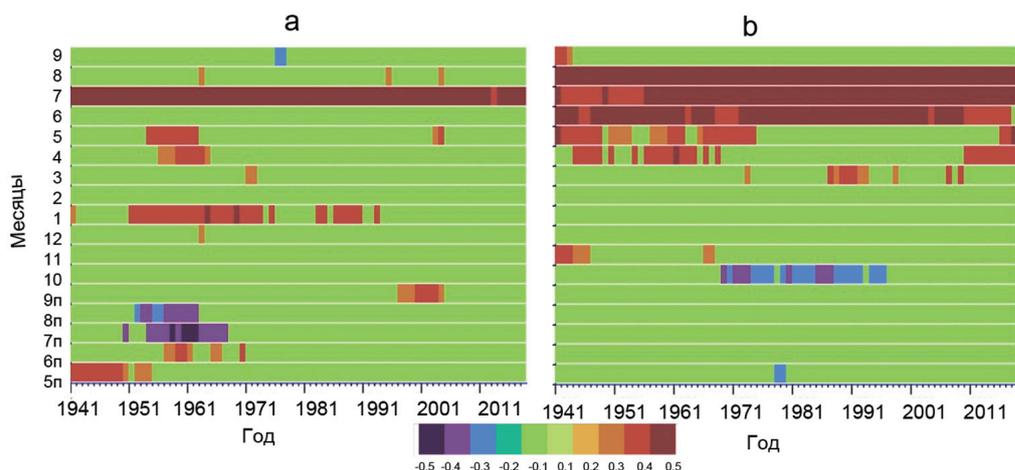


Рис. 6. Коэффициенты корреляции между индексами генерализованных хронологий ширины годичного кольца (а), ВІ (b) и температуры воздуха (CRU 4.04) методом скользящего окна размером 40 лет, с шагом в один год. «п» – месяцы предшествующего года. Оттенки зеленого – незначимые коэффициенты корреляции

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 %
ВІ	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 положи-

тельным и уменьшается в период 1950–2018 гг., что также указывает на хорошее качество предложенной модели (Fritts, 1976).

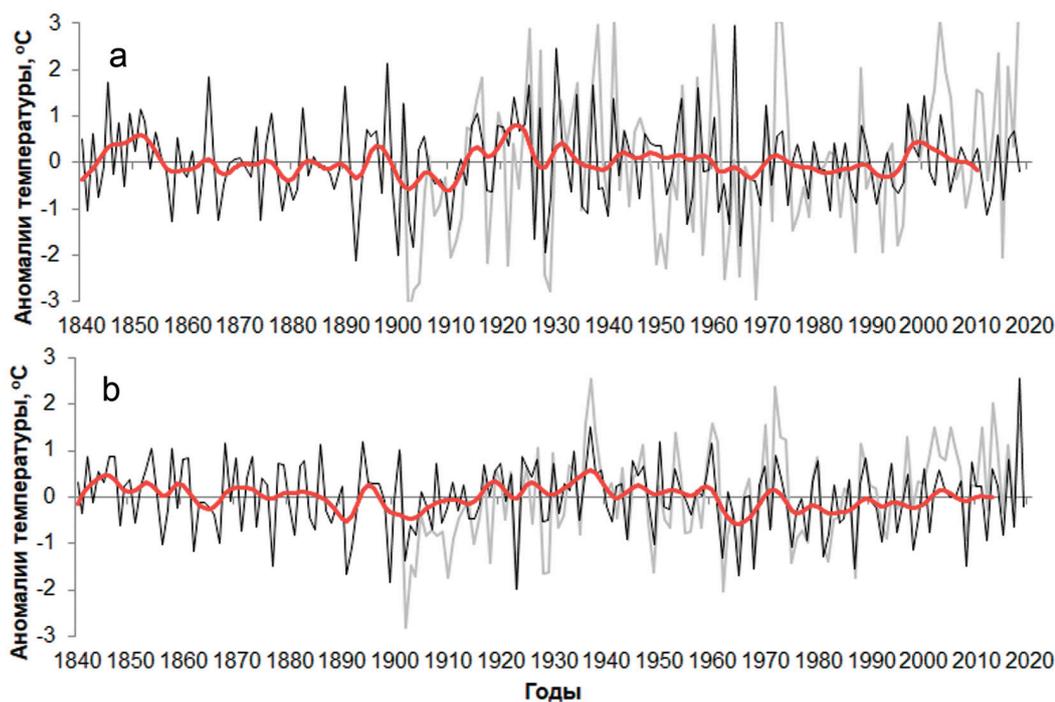


Рис. 7. Реконструкции аномалий температуры воздуха (черная линия) июля по хронологии ширины годичных колец (а) и июня-августа по хронологии по ВІ (б), сглаженные 11-летним фильтром значения (красная линия) и сравнение с инструментальными наблюдениями (серая линия)

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 избежать влияния локальных условий произрастания.

Климатический анализ показал, что несмотря на то, что в июне средняя месячная температура достигает 10 °С, 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 связа-

но 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 ВІ с продвижением на восток также характеризуются увеличением количества месяцев, влияющих на интенсивность ВІ, 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 ВІ общими месяцами, влияющими на динамику ВІ, 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 ВІ 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 ВІ 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 ВІ 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 ВІ, несмотря на очень большое сходство с инструментальными данными, также не показали выражен-

ного 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 ВІ каких-либо выраженных аномалий температуры мы не выявили. Эти результаты несколько расходятся с данными по максимальной плотности и ВІ 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 ВІ, 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 ВІ имеют сильный

температурный сигнал июня-августа, а при движении на юго-восток климатическое сезонное «окно», влияющее на ВІ годичных колец, расширяется до апреля-августа. Хронологии по ВІ 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 имею-

щиеся 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., Kirilyanov 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., Schmiede 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.ideo.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 Rogén, 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 $\delta^{13}C$ 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

DOI 10.17516/1997-1389-0386

УДК 630*561.24:551.588.7(470.54–25)

Urban Heat Island of Ekaterinburg: Does It Affect Radial Growth of the Scots Pine?

Vladimir V. Kukarskih^{a, b},
Nadezhda M. Devi^{*a}, Maksim O. Bubnov^a,
Anna V. Komarova^{a, c} and Leonid I. Agafonov^a

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the RAS
Ekaterinburg, Russian Federation*

^b*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

^c*Ural Federal University
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
Ekaterinburg, Russian Federation*

Received 04.03.2022, received in revised form 23.05.2022, accepted 22.06.2022

Abstract. In recent decades, there has been broad worldwide discussion on the impact of climate change and anthropogenic and biogenic factors on tree growth. Most studies have focused on annual growth in natural stands, while little attention has been paid to urban forests and the findings are highly controversial. Urban vegetation worldwide is influenced by the “urban heat island” effect, i.e. air temperature differences between city centers and neighborhoods. The paper presents the results of a comparative assessment of growth dynamics of four urban forest stands and four rural forest stands (outside the agglomeration of Ekaterinburg) under changing climate conditions. Over the last fifty years, a continuous trend for air temperature increase has been observed in both urban and rural areas. Nevertheless, a higher average annual temperature (by 0.9 °C) and the temperature of the growing season (by 0.9 °C) are characteristic of the climate of the city. Moisture regimen in the compared territories do not differ and no apparent trend has been observed. It was shown that the long-term dynamics of radial growth of pine trees in urban forest parks and natural landscapes was synchronous. Only 11 years out of 50 were found to yield statistically different growth values in urban and natural habitats. However, a more prominent response of radial tree growth to climatic variables was observed in urban areas. Thus, despite the warmer conditions in the metropolis, no differences in the dynamics of radial growth between urban and rural populations of the Scots pine were found, except for individual years with extreme climatic events.

© 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: nadya@ipae.uran.ru

ORCID: 0000-0002-6552-1726 (Kukarskih V.); 0000-0002-3756-4761 (Devi N.); 0000-0001-7990-1212 (Bubnov M.); 0000-0003-4595-4978 (Agafonov L.)

Keywords: *Pinus sylvestris*, radial growth, heat island, megalopolis of Ekaterinburg.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 20–44–660020). The authors are grateful to D. V. Solodyankin and R. R. Mustafin for their help in collecting field material.

Citation: Kukarskih V. V., Devi N. M., Bubnov M. O., Komarova A. V., Agafonov L. I. Urban heat island of Ekaterinburg: does it affect radial growth of the Scots pine? J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(2), 264–278. DOI: 10.17516/1997-1389-0386

Городской остров тепла г. Екатеринбурга: есть ли влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной?

**В. В. Кукарских^{а, б}, Н. М. Дэви^а,
М. О. Бубнов^а, А. В. Комарова^{а, в}, Л. И. Агафонов^а**
*^аИнститут экологии растений и животных УрО РАН
Российская Федерация, Екатеринбург
^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск
^вУральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
Российская Федерация, Екатеринбург*

Аннотация. Влияние изменения климата, антропогенных и биогенных воздействий на рост деревьев активно обсуждается в последние десятилетия по всему миру. Большинство исследований посвящено изучению годичного прироста в естественных древостоях, в то время как исследования городских лесов не столь многочисленны и весьма неоднозначны. Городская растительность во всем мире подвержена влиянию эффекта «городского острова тепла», вызывающего разницу температур воздуха между центрами городов и окрестностями. Целью представленной работы являлась сравнительная оценка динамики прироста четырех городских древостоев и четырех древостоев за пределами агломерации города Екатеринбурга в условиях изменения климата. При синхронном повышении температуры воздуха в течение последних пятидесяти лет климат города отличается более высокой среднегодовой температурой (на 0,9 °С), а также температурой вегетационного периода (на 0,9 °С). Режим увлажнения на сравниваемых территориях не различается и не имеет выраженного тренда. Показано, что многолетняя динамика радиального прироста деревьев сосны в городских лесопарках и в естественных ландшафтах синхронна. Выявлено всего 11 лет, в которые величина прироста в городе и за городом статистически различалась. В то же время для городских участков характерен более выраженный отклик радиального прироста деревьев на климатические переменные. Таким образом, несмотря на более теплые условия в мегаполисе, не обнаружено различий в динамике радиального прироста между городской и загородными

популяциями сосны обыкновенной, кроме отдельных лет с экстремальными климатическими событиями.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, радиальный прирост, остров тепла, мегаполис Екатеринбург.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ проекта 20–44–660020). Авторы благодарны Д. В. Солодянкину и Р. Р. Мустафину за помощь в сборе полевого материала.

Цитирование: Кукарских, В. В. Городской остров тепла г. Екатеринбурга: есть ли влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной? / В. В. Кукарских, Н. М. Дэви, М. О. Бубнов, А. В. Комарова, Л. И. Агафонов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 264–278. DOI: 10.17516/1997-1389-0386

Введение

Глобальной тенденцией современного развития является концентрация населения в городах, где в условиях преобразованных природных ландшафтов создается новая искусственная среда – экосистема урбанизированных территорий (Pickett et al., 2001; Alberti, 2005; Grimm et al., 2008). Города заметно меняют местный климат, формируя специфические условия, называемые «городским островом тепла» (Oke, 1982). Эффект городского острова тепла (ГОТ) проявляется в изменении температурного, ветрового, радиационного режимов и количества атмосферных осадков (Oke et al., 2017). Условия над территорией городов обычно отличаются от окружающих ландшафтов более высокими значениями режимных факторов (Voogt, Oke, 2003), также существуют сезонные различия (Chrysanthou et al., 2014). Вклад урбанизации в повышение температуры ГОТ может достигать 50 % в центре мегаполиса (Chao et al., 2020) и зависит от размеров, архитектурных особенностей городской агломерации, орографических и ландшафтных эффектов, микроклимата (Kuznetsova et al., 2017; Демин и др., 2019; Bechtel et al., 2019). Особенности городского микроклимата проявляются в основном в верхних слоях почвы и в приземном слое воздуха до высоты в несколько десятков

метров. В непосредственной близости от строений температура поверхности почвы и воздуха, как правило, выше, чем на открытой местности, благодаря теплу, отдаваемому зданиями (Bechtel et al., 2019). Также в городе уменьшается скорость ветра, что снижает интенсивность конвективного охлаждения.

Большая часть ГОТ представляет собой плато с максимальными значениями температуры воздуха в центре мегаполиса и в областях генерации тепла – зонах промышленных предприятий, объектов энергетики, крупных транспортных артерий, районах плотной жилой застройки, и разрывами в областях холода – зонами над парками и водоемами (Алексашина, Ле, 2018; Helletsgruber et al., 2020; Blachowski, Najnrych, 2021).

Промышленные предприятия и автомобили в черте города, помимо прямого выделения тепла при технологических процессах и сгорании топлива, загрязняют воздух продуктами горения и образующимися газообразными соединениями переработки материалов, концентрации которых изменяют радиационные свойства атмосферы над городом (Хромов, Петросянц, 2006; Locosselli et al., 2018).

Среднегодовая температура воздуха крупных городов может превышать темпе-

ратуру окрестностей на 1–3 °С (Kondrat'ev, Matveev, 1999; Oke et al., 2017). Контрасты температуры между городом и окрестностями наиболее выражены в спокойную антициклональную погоду и сглаживаются при сильном ветре или облачности. Влияние городского острова тепла распространяется на 30–50 км с подветренной стороны мегаполиса. В некоторых исследованиях отмечается, что загрязнение атмосферы ведет к увеличению атмосферных осадков и снижению естественной освещенности над городом (Кормилицы и др., 1997).

Эффект ГОТ может оказывать влияние на растительность, в частности на радиальный прирост деревьев (Parker, 2010; Varquez, Kanda, 2018). Оценить влияние экзогенных факторов на радиальный прирост деревьев можно с помощью древесно-кольцевого анализа (Fritts, 1976). Чаще всего проводят анализ влияния климатических факторов на рост деревьев в естественных условиях произрастания и гораздо в меньшей степени в городской среде (Hunt, Watkiss, 2011; Bartens et al., 2012; Gillner et al., 2014). В литературе приводятся данные как о негативном влиянии городской среды на радиальный рост деревьев (de Bauer, Krupa, 1990; Penninckx et al., 1999; Guardans, 2002; Dittmar et al., 2003; Juknys et al., 2003; Scharnweber et al., 2011; Kint et al., 2012; Chappelka, Grulke, 2016), так и о положительном влиянии климата и некоторых видов загрязнения окружающей среды на рост деревьев в городских лесах (Spiecker et al., 1996; Bytnerowicz et al., 2007; Fang et al., 2014; Pretzsch et al., 2014). Так, в обзорной работе Претцша с соавторами (Pretzsch et al., 2017) показано увеличение темпов роста городских деревьев в 1300 городах, расположенных в различных климатических зонах Земли, начиная с 1960-х годов. Этот эффект был наиболее выражен в бореальной климатической

зоне, что подтверждается также рядом других исследований, рассматриваемых в обзоре Бутнеровича с соавторами (Bytnerowicz et al., 2007).

Для крупных городских агломераций Российской Федерации, в том числе для Екатеринбургa, проведены оценки выраженности ГОТ (Танский, Мазуров, 2010; Kuznetsova et al., 2017; Shumilov et al., 2017), при этом отсутствуют данные по оценке степени влияния ГОТ на прирост древесных растений.

В работе представлено исследование изменений зонального климата и ГОТ г. Екатеринбургa за последние 50 лет и их влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной в черте города и за его пределами.

Материалы и методы

Район исследования

Город Екатеринбург (56°47'N, 60°37'E, 237 м над у.м.) расположен в центральной части Евразийского материка, на границе Европы и Азии, в срединной части Уральского хребта. Является административным центром Уральского федерального округа и Свердловской области. В Екатеринбурге проживает 1,5 миллиона человек и отмечается высокая концентрация промышленных предприятий машиностроения, энергетики, металлургии, химии, строительства, легкой и пищевой промышленности (Вершинин, 2014).

Климат района исследования

Климат Среднего Урала влажный континентальный с холодной зимой, отсутствием сухого сезона, теплым летом и выраженной сезонностью (Алисов, Полтараус, 1962). Среднегодовая температура воздуха 1,9 °С. Среднегодовое количество осадков 471 мм. Продолжительность вегетационного периода 160–170 дней, безморозного периода 90–100 дней. Погодно-климатические условия в ГОТ

исследовали по данным метеостанции Екатеринбург, для загородных территорий использовали данные метеостанций Ревда (40 км к западу от Екатеринбурга) и Верхнее Дуброво (29 км к востоку от Екатеринбурга) на общем интервале 1970–2020 гг. Во все сезоны, в том числе и в годовом разрезе, преобладают ветра западного, северо-западного и юго-западного направлений.

*Отбор кернов,
обработка и анализ данных*

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – основная лесобразующая порода района исследования. Работа выполнена в четырех

лесопарках г. Екатеринбурга и четырех естественных древостоях за чертой города на расстоянии 18–45 км от центра города с учетом направления господствующих ветров, чтобы исключить влияние переноса тепла от ГОТ к естественным ландшафтам (рис. 1). Участки с естественным ландшафтом 1, 2, 3 и 4 выбирали в сходных лесорастительных условиях – сосняк ягодниковый (Колесников и др., 1973). Керны древесины на всех участках брали с 15–21 доминантных деревьев на высоте 1,3 м. В анализе использовали 145 кернов, по одному с дерева. Керны обработаны по стандартной дендрохронологической методике (Ваганов и др., 1996; Stokes, Smiley,

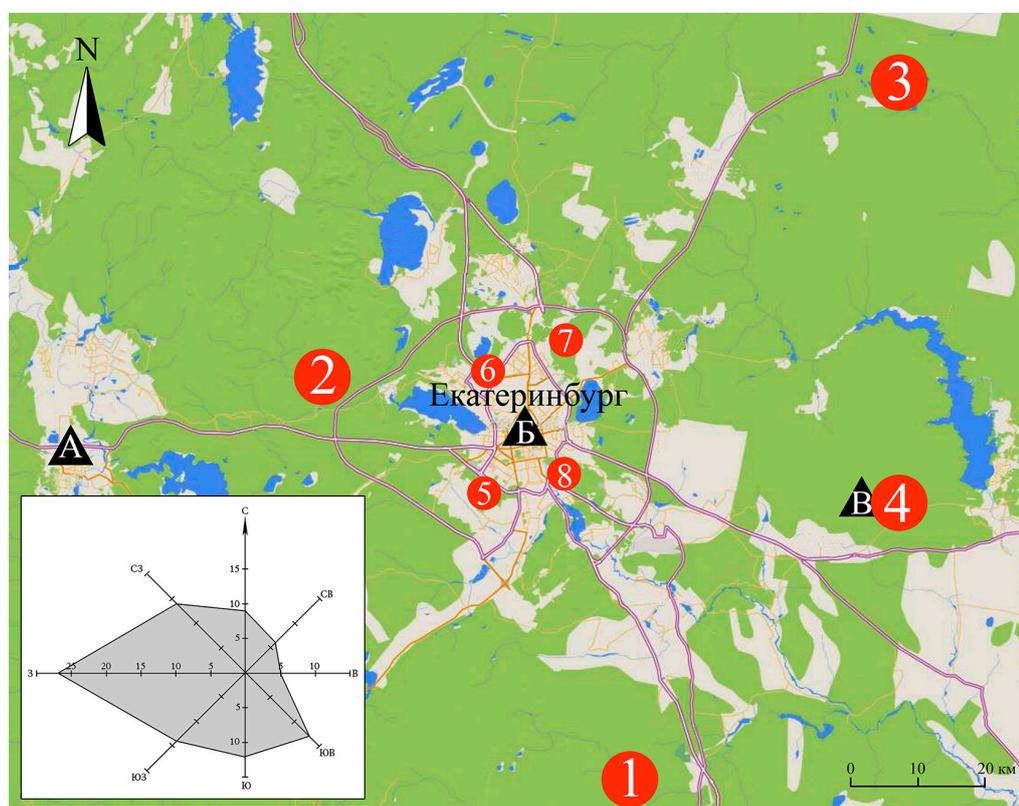


Рис. 1. Карта района исследования. Участки 1–4 располагаются в древостоях вне города, участки 5–8 расположены в черте города. Треугольниками обозначены метеостанции: А – Ревда, Б – Екатеринбург, В – Верхнее Дуброво. На врезке представлено среднегодовое распределение повторяемости ветров, в %

Fig. 1. Map of the study area: 1–4 – rural forest stands, 5–8 – urban forest stands. Triangles indicate weather stations: A – Ryvda, B – Ekaterinburg, C – Verkhneye Dubrovo. The inset shows the average annual distribution of wind frequency in %

1996). Ширина годовых колец (ШГК) измерена на комплексе LINTAB в программном пакете TSAP (Rinn, 1996). Все образцы были перекрестно датированы, качество датировки проверялось в программе COFECOA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Характеристика участков и древесно-кольцевых хронологий представлена в табл. 1.

Влияние возраста деревьев и случайных факторов неклиматического характера на величину радиального прироста устраняли стандартизацией индивидуальных хронологий методом кубического сплайна с отсечением 67 % длительности хронологии (Cook, Peters, 1981) в пакете dplR в статистической среде R (Bunn, 2008; R Core Team, 2019). В этом же программном пакете были получены обобщенные индексированные хронологии для каждого участка. Корреляционные функции связи обобщенных хроно-

логий индексов прироста с климатическими факторами (температура воздуха, атмосферные осадки) рассчитывали в программе DENDROCLIM2002 (Biondi, Waikul, 2004). Сравнение средних значений метеоданных проведено с помощью критерия Краскела-Уоллиса, индексированных значений прироста – критерия Манна-Уитни.

Анализ динамики радиального прироста деревьев проведен за период с 1970 по 2020 год. Данный период выбран в связи с тем, что в предшествующий период (1930–1960-е годы) растительность в городе подвергалась сильному антропогенному и биотическому стрессу (Kukarskih et al., 2022). Следовательно, выбранные временные рамки установлены, чтобы иметь возможность сравнивать климатогенную динамику радиального прироста городских и естественных древесств.

Таблица 1. Характеристики участков исследования

Table 1. Sampling sites characteristics

№	Код хронологии	Ближайший населенный пункт	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Высота, м н.у.м.	Количество деревьев, шт.	Длина хронологии, годы/лет	Средняя ширина годовичного прироста, мм	Коэффициент чувствительности
1	VSS	Верхняя Сысерть	56.43	60.79	270	18	1880–2018 139	1,57	0,25
2	SEV	Северка	56.84	60.31	310	18	1790–2020 231	1,2	0,20
3	LOS	Лосинный	57.11	61.17	250	18	1770–2020 251	1,35	0,20
4	VDU	Верхнее Дуброво	56.76	61.13	260	21	1850–2018 169	1,51	0,26
5	UZP	Юго-Западный лесопарк	56.79	60.55	280	17	1790–2020 231	1,39	0,27
6	PLP	Парк Победы	56.89	60.57	315	17	1860–2020 161	1,41	0,24
7	KLP	Калиновский лесопарк	56.9	60.66	285	21	1880–2020 139	1,3	0,29
8	PLR	Парк лесоводов России	56.8	60.65	265	15	1790–2020 231	1,1	0,26

Результаты и обсуждение

Динамика климатических параметров

В Екатеринбурге (ГОТ) и за чертой города в каждое десятилетие с 1970 по 2020 год средняя годовая температура повышалась (рис. 2А), при этом в пределах ГОТ она была выше, чем на обеих загородных метеостанциях. Различия варьировали от 0,6 до 1,0 °С ($p < 0,05$, $n=10$). В целом, на 50-летнем интервале различие между средней годовой температурой ГОТ и загородными метеостанциями составляет $0,9 \pm 0,1$ °С ($p < 0,05$, $n=49$).

Средние температуры мая-августа по десятилетиям различаются незначимо (рис. 2Б), однако за весь 50-летний период температура воздуха этих месяцев в городе выше на $0,9 \pm 0,1$ °С. Рост средних температур за прошедшие 50 лет в ГОТ и вне города происходил синхронно.

Для суммы осадков как годовых (рис. 2В), так и в период активного роста деревьев (май-август) (рис. 2Г) не выявлено значимых различий между территорией ГОТ и загородными территориями. Годовое количество осадков и количество осадков за май-август по десятилетиям возрастало до 2000 года и затем начало снижаться.

Динамика радиального прироста и отклик на климат

В последние 50 лет многолетняя динамика радиального прироста генерализованных хронологий сосны в городских лесопарках и в естественных ландшафтах была синхронна. Выявлено всего 11 лет, в которые величина прироста в городе и за городом статистически различалась. Так, в 1971–1977 годах (за исключением 1975 года), прирост за городом был выше, а в 1981, 1986, 1990, 1999, 2003 ниже по сравнению с приростом в городе (табл. 2). Такая синхронизация роста предполагает наличие единого комплекса климати-

ческих факторов, определяющих динамику радиального прироста. Прирост сосны обыкновенной, произрастающей на территории города, главным образом отрицательно коррелирует с температурами мая и июня. Также отмечается положительная связь с осадками мая и июля. Для загородных участков отклик на климат более слабый и менее стабильный. Установлена положительная связь с осадками июня и отрицательная с температурами воздуха того же месяца. Для обеих сравниваемых хронологий также выявлена отрицательная связь с осадками ноября (рис. 3).

В целом, для городских участков характерен более выраженный отклик на климатические переменные, что может быть связано с менее благоприятными для роста деревьев условиями в зоне ГОТ за счет повышенных температур и дефицита влажности. Относительно невысокие коэффициенты корреляции прироста с климатом как в городе, так и за городом объясняются тем, что климатические условия Среднего Урала являются субоптимальными для роста сосны обыкновенной (Рысин, Савельева, 2008).

Различия в радиальном приросте городских и загородных древостоев

Рассматривая возможные причины различий в приросте загородных и городских популяций сосны, необходимо учитывать историю исследуемых древостоев. До начала разрастания городской агломерации исследованные лесопарки являлись едиными массивами с естественными древостоями. Увеличение производственных мощностей заводов и фабрик в 1942–1951 годах (Васильев, 1982; Антуфьев, 1992) привело к многократному увеличению выбросов загрязняющих веществ атмосферу, что отрицательно сказалось на темпах роста деревьев. На фоне череды лет с недостаточным увлажнением и засухой

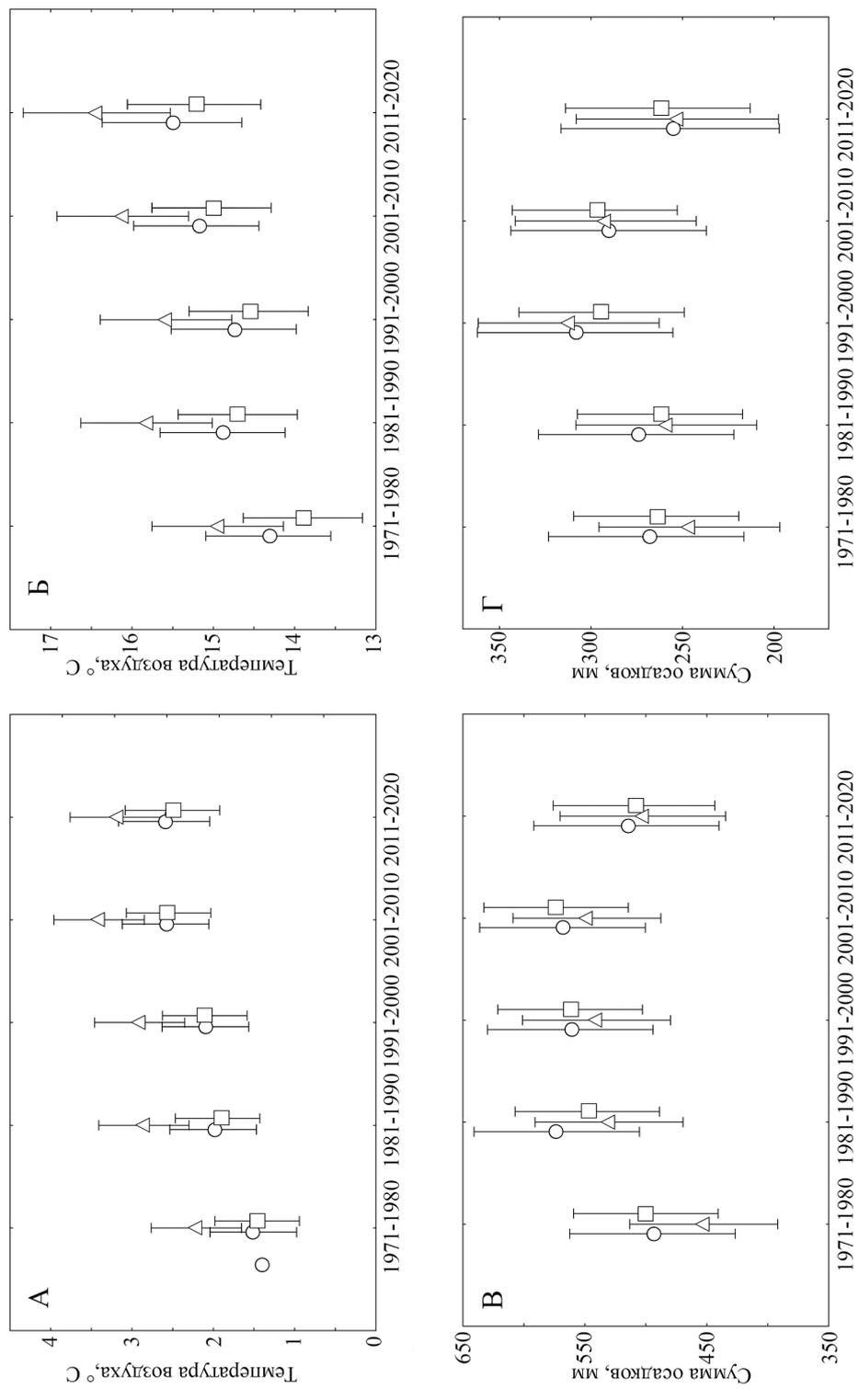


Рис. 2. Динамика средней температуры воздуха за год (А) и средней температуры мая-августа (Б), а также сумма осадков за год (В) и сумма осадков мая-августа (Г). Метеостанции: треугольники – Екатеринбург, круги – Ревда, квадраты – Верхнее Дуброво. Вертикальными линиями приведены значения 95 % доверительных интервалов

Fig. 2. Dynamics of average annual (A) and average May-August temperatures (B); total annual precipitation (C) and total May-August precipitation (D). All data supplied by the weather stations in the study area: triangular markers – Ekaterinburg, circles – Verneye Dubrovo, squares – Verneye Dubrovo. Vertical lines indicate 95 % confidence intervals

Таблица 2. Статистически отличающийся радиальный прирост деревьев сосны обыкновенной в городских и загородных популяциях: статистические параметры для соответствующих лет

Table 2. Significantly different radial growth of Scots pine trees in urban and rural populations: statistical parameters for relevant years

Год	Сумма рангов "Вне города"	Сумма рангов "Город"	Значение критерия Манна-Уитни (U)	Уровень значимости (p)	Количество моделей "Вне города"	Количество моделей "Город"	Разница в приросте "Вне города" – "Город", %
1971	4127	2428	1153	0,011	85	60	21
1972	4029	2526	1251	0,047	85	60	17
1973	4423	2132	857	0,000	85	50	33
1974	4234	2322	1047	0,002	85	60	25
1976	4335	2220	945	0,000	85	60	31
1977	4428	2127	852	0,000	85	60	34
1981	3101	3454	1021	0,001	85	60	-36
1986	3205	3350	1125	0,007	85	60	-31
1990	2827	3729	747	0,000	85	60	-41
1999	3194	3361	1114	0,006	85	60	-17
2003	3273	3282	1193	0,020	85	60	-14

в 1950-е годы на территории города произошла массовая вспышка численности шелкопряда монашенки (*Lymantria monacha* L.) (Kukarskih et al., 2022). Дефолиация привела к резкому сокращению ширины древесных колец, а в некоторых случаях к их полному выпадению. После окончания вспышки ассимиляционный аппарат хвойных растений восстанавливался в течение нескольких лет, поэтому восстановление прироста в городских хронологиях произошло только к 1970-м годам (рис. 4). В период с 1970 по 1977 год прирост деревьев за чертой ГОТ был на 17–34 % выше, чем в городе, за исключением 1975 года, когда аномальная летняя засуха привела к синхронизации приростов во всех насаждениях.

Начиная с 1980 года средние значения прироста в городе никогда не были меньше, чем на загородных участках, а в отдельные годы были значительно выше.

Так, в 1981 и 1986 годах ширина годовых колец деревьев в городе была значимо

больше по сравнению с загородными – на 36 и 31 % соответственно. Столь большая разница объясняется термическими условиями мая, а точнее резким понижением температуры, особенно заморозками в 1–2-й декадах (рис. 5). Согласно работе Танского и Мазурова (2010), наибольшие различия термического режима между крупными городами и пригородами наблюдаются для минимальной температуры воздуха. Для Екатеринбурга разница в весенние месяцы может составлять до 9 градусов. В частности, в 1981 и 1986 годах заморозки за городом продолжались на 2 дня дольше и были на 0,2–0,7 градуса суровее, чем в городе, что привело к снижению радиального прироста деревьев.

Остается не до конца понятным значительно более высокий прирост в городских лесопарках в 1990 году. Условия вегетационного сезона в этом году не отличались экстремальными значениями температуры. Единственным объяснением может быть значительно большее количество осадков вегетационного

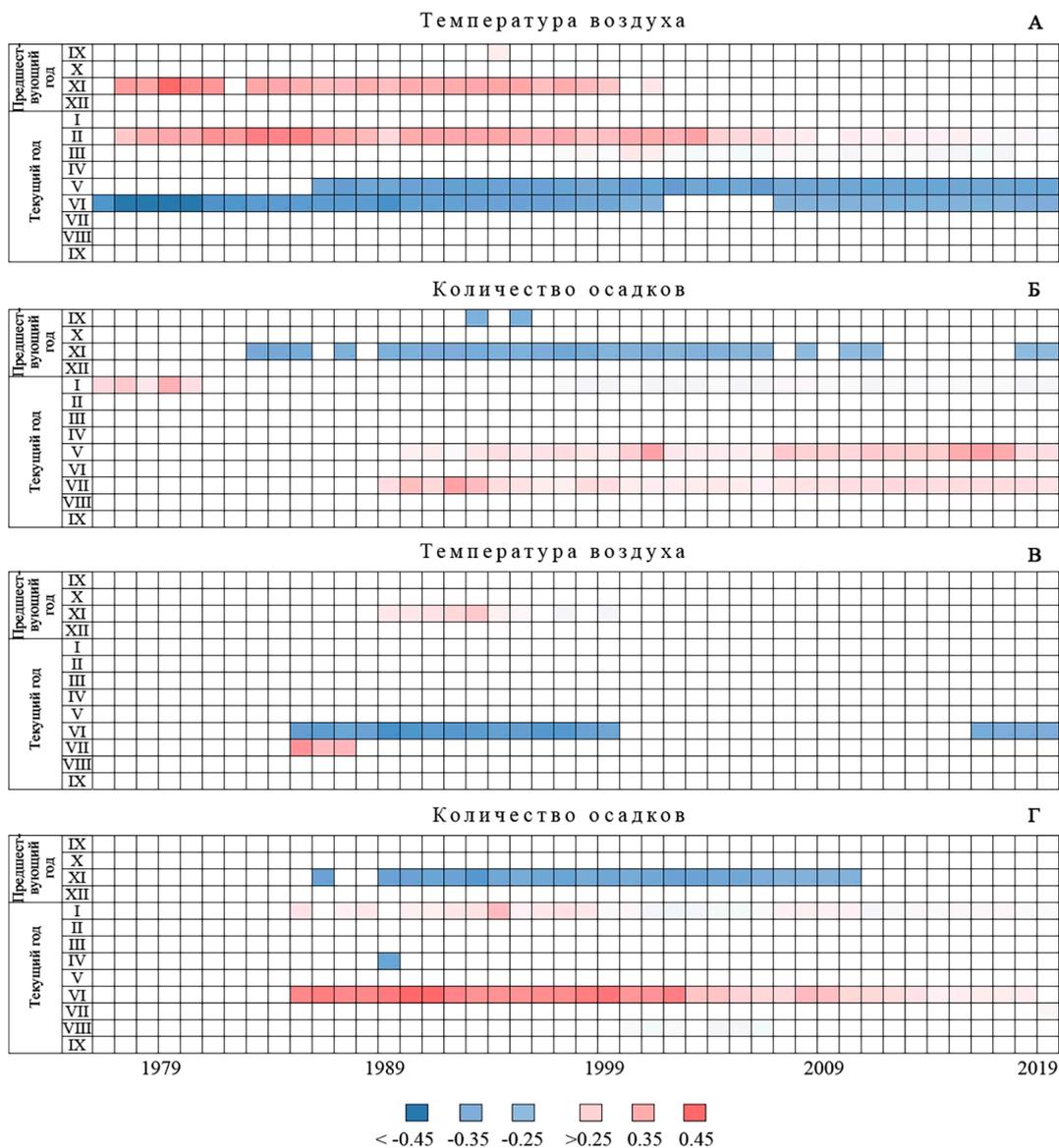


Рис. 3. Динамика отклика радиального прироста на температуру воздуха и количество осадков для городских (А, Б) и загородных (В, Г) участков. Заливкой обозначены частные коэффициенты корреляции, достоверно отличающиеся от 0 при N=26, $p < 0,05$

Fig. 3. Dynamics of radial growth response to air temperature and precipitation for urban (A, B) and rural (C, D) sites. Colour intensities indicate individual correlation coefficients significantly different from 0 at N=26, $p < 0.05$

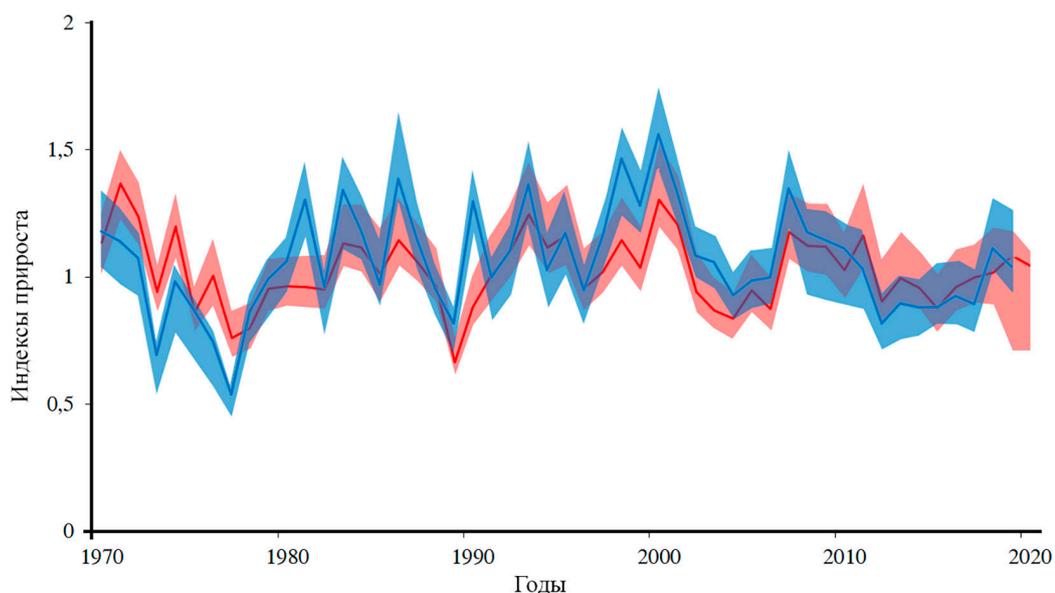


Рис. 4. Динамика радиального прироста генерализованных древесно-кольцевых хронологий из городских лесопарков (синяя линия) и естественных загородных ландшафтов (красная линия). Заливкой отмечены 95 % доверительные интервалы

Fig. 4. Generalized tree-ring chronologies for urban (blue line) and rural (red line) sites. Shaded areas indicate 95 % confidence intervals

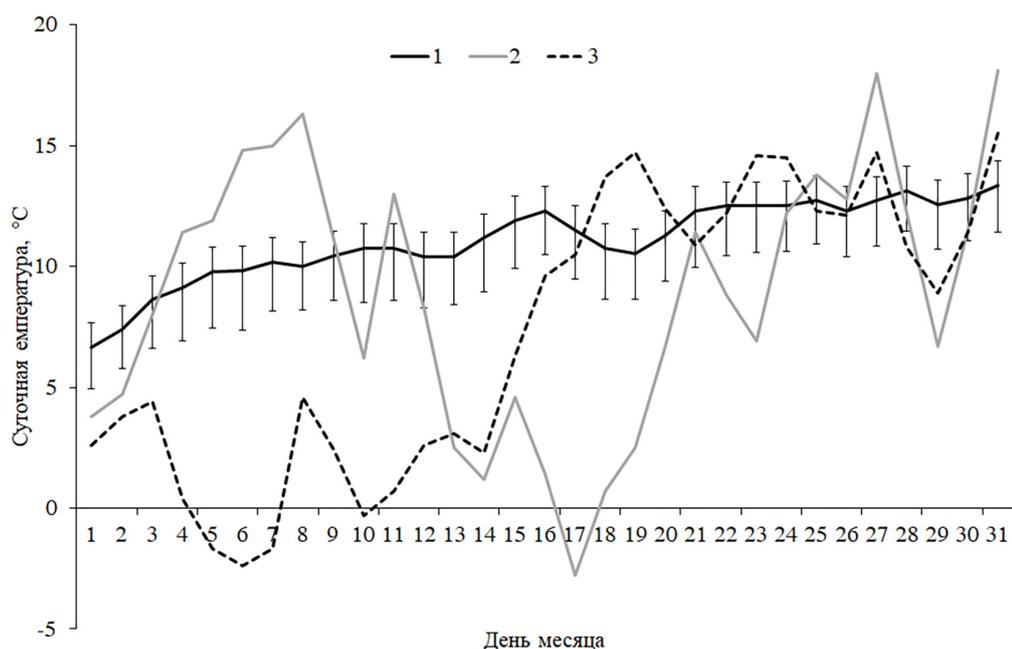


Рис. 5. Динамика средней суточной температуры мая. 1 – за период 1961–1990 гг. (вертикальными линиями приведены значения 95 % доверительных интервалов); 2 – в 1981 году; 3 – в 1986 году

Fig. 5. Dynamics of average daily temperature in May: 1 – over the period of 1961–1990 (vertical lines indicate 95 % confidence intervals); 2 – in 1981; 3 – in 1986

периода (на 50 % больше многолетней нормы) и один из самых высоких значений индекса сухости Палмера (PDSI) – 2,9 при среднем многолетнем значении 0,4.

Заключение

Мегаполис Екатеринбург формирует своеобразный микроклимат в пределах городской агломерации. Главным образом, это проявляется в более высоких значениях температуры воздуха. В среднем в городе теплее на 0,9 °C по сравнению с прилегающими территориями, при этом осадков выпадает столько же.

Остров тепла, формируемый городом, не оказывает значительного влияния на прирост сосны обыкновенной. Основным эффектом городского микроклимата является сглаживание влияния температурных экс-

тремумов на радиальный прирост – в годы с поздними майскими заморозками деревья в городе формируют более широкие кольца.

На рост городских деревьев наиболее часто влияют дефицит увлажненности, повышенные температуры воздуха, уплотненная почва, а также техногенное загрязнение воздуха и почвы. Несмотря на эти препятствующие росту условия, наше исследование показало, что городские деревья растут не хуже, чем деревья в естественных древостоях. Возможно, отсутствие четко выраженного сигнала на потепление в пределах ГОТ связано с выбором сосны обыкновенной в качестве объекта исследования. В пределах Среднего Урала рост сосны определяется температурой воздуха лишь частично и разница в 1 °C не находит своего отражения в увеличении радиального прироста.

Список литературы / References

Алексашина В. В., Ле М. Т. (2018) Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса. *Проблемы региональной экологии*, 5: 36–40 [Aleksashina V. V., Le M. T. (2018) Influence of the urban heat island effects on the ecology of the megacity. *Regional Environmental Issues* [Problemy regional'noj ekologii], 5: 36–40 (in Russian)]

Алисов Б. П., Полтараус Б. В. (1962) *Климатология*. М., Издательство Московского университета, 226 с. [Alisov B. P., Poltaraus B. V. (1962) *Climatology*. Moscow, Moscow State University Press, 226 p. (in Russian)]

Антуфьев А. А. (1992) *Уральская промышленность накануне и в годы Великой Отечественной войны*. Екатеринбург, Институт истории и археологии, 336 с. [Antufiev A. A. (1992) *Ural industry on the eve and during the Great Patriotic War*. Ekaterinburg, Institute of History and Archaeology, 336 p. (in Russian)]

Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. (1996) *Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике*. Новосибирск, Наука, 246 с. [Vaganov E. A., Shiyatov S. G., Mazepa V. S. (1996) *Dendroclimatic studies in Subarctic Ural and Siberia*. Novosibirsk, Nauka, 246 p. (in Russian)]

Васильев А. Ф. (1982) *Промышленность Урала в годы Великой Отечественной войны. 1941–1945 гг.* М., Наука, 279 с. [Vasiliev A. F. (1982) *Industry of the Urals during the Great Patriotic War. 1941–1945*. Moscow, Nauka, 279 p. (in Russian)]

Вершинин В. Л. (2014) *Экология города*. Екатеринбург, Урал, 88 с. [Vershinin V. L. (2014) *Urban Ecology*. Ekaterinburg, Ural, 88 p. (in Russian)]

Демин В. И., Козелов Б. В., Горбань Ю. А., Меньшов Ю. В., Собакин А. П. (2019) Влияние микроклимата на оценки интенсивности городского острова тепла. *Фундаментальная и приклад-*

ная климатология, 3: 76–91 [Demin V.I., Kozelov B. V., Gorban Yu.A., Menshov Yu.V., Sobakin A. P. (2019) The influence of microclimate on the assessment of intensity of a heat city island. *Fundamental and Applied Climatology* [Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya], 3: 76–91 (in Russian)]

Колесников Б. П., Зубарева Р. С., Смолоногов Е. П. (1973) *Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Практ. руководство*. Свердловск, 176 с. [Kolesnikov B. P., Zubareva R. S., Smolonogov E. P. (1973) *Forest and vegetation conditions and forest types in the Sverdlovsk Region: a practical guide*. Sverdlovsk, 176 p. (in Russian)]

Кормилицын В. И., Цицкишвили М. С., Яламов Ю. И. (1997) *Основы экологии*. М., МПУ, 368 с. [Kormilitsyn V. I., Tsitskishvili M. S., Yalamov Y. I. (1997) *Basics of Ecology*. Moscow, Moscow State Pedagogical University, 368 p. (in Russian)]

Рысин Л. П., Савельева Л. И. (2008) *Сосновые леса России*. М., Товарищество научных изданий КМК, 289 с. [Rysin L. P., Savelyeva L. I. (2008) *Pine forests of Russia*. Moscow, КМК Publishing House, 289 p. (in Russian)]

Танский А. О., Мазуров Г. И. (2010) Анализ острова тепла над некоторыми городами Российской Федерации. *Метеорологический вестник*, 3(3): 80–122 [Tanskiy A. O., Mazurov G. I. (2010) An analysis of some urban heat islands in the Russian Federation. *Meteorological Bulletin* [Meteorologicheskij vestnik], 3(3): 80–122 (in Russian)]

Хромов С. П., Петросянц М. А. (2006) *Метеорология и климатология*. М., МГУ, 584 с. [Khromov S. P., Petrosyants M. A. (2006) *Meteorology and climatology*. Moscow, Moscow State University, 584 p. (in Russian)]

Alberti M. (2005) The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 28(2): 168–192

Bartens J., Grissino-Mayer H.D., Day S.D., Wiseman P.E. (2012) Evaluating the potential for dendrochronological analysis of live oak (*Quercus virginiana* Mill.) from the urban and rural environment – an explorative study. *Dendrochronologia*, 30(1): 15–21

Bechtel B., Demuzere M., Mills G., Zhan W., Sismanidis P., Small C., Voogt J. (2019) SUHI analysis using Local Climate Zones – A comparison of 50 cities. *Urban Climate*, 28: 100451

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

Blachowski J., Hajnrych M. (2021) Assessing the cooling effect of four urban parks of different sizes in a temperate continental climate zone: Wroclaw (Poland). *Forests*, 12(8): 1136

Bunn A. G. (2008) A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2): 115–124

Bytnerowicz A., Omasa K., Paoletti E. (2007) Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. *Environmental Pollution*, 147(3): 438–445

Chappelka A. H., Grulke N. E. (2016) Disruption of the ‘disease triangle’ by chemical and physical environmental change. *Plant Biology*, 18: 5–12

Chao L., Huang B., Yuanjian Y., Jones P., Cheng J., Yang Y., Li Q. (2020) A new evaluation of the role of urbanization to warming at various spatial scales: Evidence from the Guangdong-Hong Kong-Macau region, China. *Geophysical Research Letters*, 47(20): e2020GL089152

Chrysanthou A., van der Schrier G., van den Besselaar E. J. M., Klein Tank A. M. G., Brandsma T. (2014) The effects of urbanization on the rise of the European temperature since 1960. *Geophysical Research Letters*, 41(21): 7716–7722

- Cook E. R., Peters K. (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41: 45–53
- de Bauer L. I., Krupa S. V. (1990) The valley of Mexico: Summary of observational studies on its air quality and effects on vegetation. *Environmental Pollution*, 65(2): 109–118
- Dittmar C., Zech W., Elling W. (2003) Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173(1–3): 63–78
- Fang J., Kato T., Guo Z., Yang Y., Hu H., Shen H., Zhao X., Kishimoto-Mo A.W., Tang Y., Houghton R. A. (2014) Evidence for environmentally enhanced forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(26): 9527–9532
- Fritts H. C. (1976) *Tree rings and climate*. London, Academic Press
- Gillner S., Bräuning A., Roloff A. (2014) Dendrochronological analysis of urban trees: climatic response and impact of drought on frequently used tree species. *Trees*, 28(4): 1079–1093
- Grimm N. B., Faeth S. H., Golubiewski N. E., Redman C. L., Wu J., Bai X., Briggs J. M. (2008) Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864): 756–760
- Grissino-Mayer H. D. (2001) Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57: 205–221
- Guardans R. (2002) Estimation of climate change influence on the sensitivity of trees in Europe to air pollution concentrations. *Environmental Science and Policy*, 5(4): 319–333
- Hellensgruber C., Gillner S., Gulyas A., Junker R. R., Tanacs E., Hof A. (2020) Identifying tree traits for cooling urban heat islands – a cross-city empirical analysis. *Forests*, 11(10): 1064
- Holmes R. L. (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 69–78
- Hunt A., Watkiss P. (2011) Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Climatic Change*, 104(1): 13–49
- Juknys R., Vencloviene J., Stravinskiene V., Augustaitis A., Bartkevicius E. (2003) Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growth and condition in a polluted environment: from decline to recovery. *Environmental Pollution*, 125(2): 205–212
- Kint V., Aertsen W., Campioli M., Vansteenkiste D., Delcloo A., Muys B. (2012) Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901–2008. *Climatic Change*, 115(2): 343–363
- Kondrat'ev K. Ya., Matveev L. T. (1999) Basic factors governing the formation of heat island in a large city. *Doklady Earth Sciences*, 367: 741–744
- Kukarskih V. V., Devi N. M., Bubnov M. O., Komarova A. V., Agafonov L. I. (2022) Radial growth of Scots pine in urban and rural populations of Ekaterinburg megalopolis. *Dendrochronologia*, 74: 125974
- Kuznetsova I. N., Brusova N. E., Nakhaev M. I. (2017) Moscow urban heat island: detection, boundaries, and variability. *Russian Meteorology and Hydrology*, 42(5): 305–313
- Locosselli G. M., Chacón-Madrid K., Zezzi Arruda M. A., Pereira de Camargo E., Lopes Moreira T. C., Saldiva de André C. D., Afonso de André P., Singer J. M., Nascimento Saldiva P. H., Buckeridge M. S. (2018) Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, 242: 320–328

Oke T.R. (1982) The energetic basis of the urban heat-island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455): 1–24

Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J. A. (2017) *Urban climates*. Cambridge University Press, 525 p.

Parker D.E. (2010) Urban heat island effects on estimates of observed climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1): 123–133

Penninckx V., Meerts P., Herbauts J., Gruber W. (1999) Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. *Forest Ecology and Management*, 113(1): 23–33

Pickett S.T.A., Cadenasso M.L., Grove J.M., Nilon C.H., Pouyat R.V., Zipperer W.C., Costanza R. (2001) Urban ecological systems: linking terrestrial, ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32: 127–157

Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. (2014) Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications*, 5: 4967

Pretzsch H., Biber P., Uhl E., Dahlhausen J., Schütze G., Perkins D., Rötzer T., Caldentey J., Koike T., Con T. Van, Chavanne A., Toit B. Du, Foster K., Lefer B. (2017) Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports*, 7(1): 15403

R Core Team (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing. URL: www.R-project.org/

Rinn F. (1996) *Tsap V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation*. Heidelberg, Germany

Scharnweber T., Manthey M., Criegee C., Bauwe A., Schröder C., Wilmking M. (2011) Drought matters – Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. *Forest Ecology and Management*, 262(6): 947–961

Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Kanatjev A.G. (2017) Urban heat island investigations in Arctic cities of northwestern Russia. *Journal of Meteorological Research*, 31(6): 1161–1166

Spiecker H., Mielikäinen K., Köhl M., Skovsgaard J.P. (Eds.) (1996) *Growth trends in European forests: studies from 12 countries*. Springer, 372 p.

Stokes M.A., Smiley T.L. (1996) *An introduction to tree-ring dating*. Tucson, University of Arizona Press, 73 p.

Varquez A.C.G., Kanda M. (2018) Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960–2009). *npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1): 32

Voogt J.A., Oke T.R. (2003) Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 370–384

DOI 10.17516/1997-1389-0387

УДК 903.39:902.674(571.54)”18”

Dendrochronological Study of a 19th-Century Log Cabin (the Ethnographic Museum of Peoples of Transbaikalia, Buryatia)

Sergey G. Andreev*,
Alexandr A. Ayurzhanayev, Eduard A. Batotsyrenov,
Andrey G. Suprunenko, Sayga A. Sat,
Bator V. Sodnomov and Vladimir N. Chernykh
Baikal Institute of Nature Management SB RAS
Ulan-Ude, Russian Federation

Received 03.03.2022, received in revised form 23.05.2022, accepted 20.06.2022

Abstract. The method of dendrochronological analysis, or tree-ring dating, is widely used for dating historical wooden buildings. In contrast to the European part of Russia, dendrochronological research of archaeological and historical wood in Siberia has begun only in recent decades. For this reason, few studies have been conducted in the vast region of Transbaikalia. This paper presents the results of dating of a log cabin used as an exile transit station preserved as an exhibit in the Ethnographic Museum of Peoples of Transbaikalia. An analysis of selected wood core samples (total 40 samples from the external and internal walls and the ceiling) revealed that some of the trees used for the building of the cabin were felled between November 1828 and March 1829. Thus, we managed to ascertain the date of the construction of the cabin, which according to the records of the museum dates back to the mid-19th century. The dendrochronological material collected from the log cabin allowed to extend significantly the regional scales for historical timber dating, and to obtain new information about moisture cycles of the Lake Baikal basin. Further studies of other sites of historical and cultural heritage of Transbaikalia are planned.

Keywords: dendrochronology, objects of historical and cultural heritage, historical buildings, log cabin, cross dating, indexes, Decembrists, Transbaikalia.

© 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: baikal.andreev@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6599-2165 (Andreev S.); 0000-0002-2282-7848 (Ayurzhanayev A.); 0000-0003-3307-0040 (Batotsyrenov E.); 0000-0003-4587-4978 (Sat S.); 0000-0002-4099-7226 (Sodnomov B.); 0000-0001-9365-7340 (Chernykh V.)

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Assignment for the Baikal Institute of Nature Management SB RAS (AAAA-A21-121011990023-1). The authors thank anonymous referees for valuable comments.

Citation: Andreev S. G., Ayurzhanayev A. A., Batotsyrenov E. A., Suprunenko A. G., Sat S. A., Sodnomov B. V., Chernykh V. N. Dendrochronological study of a 19th-century log cabin (the Ethnographic Museum of Peoples of Transbaikalia, Buryatia). J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(2), 279–292. DOI: 10.17516/1997-1389-0387

**Дендрохронологическое исследование
этапного амбара XIX в.
(Этнографический музей
народов Забайкалья, г. Улан-Удэ)**

**С. Г. Андреев, А. А. Аюржанаев,
Э. А. Батоцыренов, А. Г. Супруненко,
С. А. Сат, Б. В. Содномов, В. Н. Черных**
*Байкальский институт природопользования СО РАН
Российская Федерация, Улан-Удэ*

Аннотация. Метод дендрохронологического анализа широко используется для датирования исторических деревянных построек. По сравнению с европейской частью России дендрохронологические исследования археологических и исторических объектов в Сибири начали развиваться лишь в последние десятилетия. При этом до сих пор обширный регион Забайкалья в данном отношении остается малоизученным. В настоящей работе приводятся результаты датирования этапного амбара – экспоната Этнографического музея народов Забайкалья. Отбор древесных кернов (всего 40 образцов с внешних, внутренних стен и потолочного перекрытия дома) и последующий анализ выявили, что часть деревьев, использованных для постройки амбара, срублены в период с ноября 1828 г. по март 1829 г. Предположительный год строительства 1829 г. Таким образом, удалось уточнить дату постройки амбара, который по учетным записям музея датируется серединой XIX в. На основании полученных данных и анализа исторических хроник сделано предположение, что этапный амбар построен, в том числе, для этапирования декабристов. Дендрохронологический материал, собранный с этапного амбара, позволяет существенно продлевать региональные шкалы для датировки исторической древесины и получить новую информацию о цикличности режима увлажнения в бассейне оз. Байкал. Планируется расширить аналогичные исследования на другие объекты историко-культурного наследия Забайкалья.

Ключевые слова: дендрохронология, объекты историко-культурного наследия, исторические постройки, этапный амбар, перекрестная датировка, индексы, декабристы, Забайкалье.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН (AAAA-A21-121011990023-1). Авторы благодарят анонимных рецензентов за ценные замечания.

Цитирование: Андреев, С. Г. Дендрохронологическое исследование этапного амбара XIX в. (Этнографический музей народов Забайкалья, г. Улан-Удэ) / С. Г. Андреев, А. А. Аюджанаев, Э. А. Батоцыренов, А. Г. Супруненко, С. А. Сат, Б. В. Содномов, В. Н. Черных // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(2). С. 279–292. DOI: 10.17516/1997-1389-0387

Введение

Дендрохронологический метод является одним из самых точных методов датирования деревянных объектов. С середины XX в. он успешно применяется для определения года постройки исторических объектов в России. Для европейской части РФ получены дендрохронологические шкалы для архитектурных памятников – русских средневековых городов (Karpukhin, 2009). Среди них по количеству датированных образцов выделяются новгородская хронология (Колчин, 1962; Тарабардина, 2005), псковская хронология (Кулакова, 2006) и тверская хронология (Черных, Карпухин, 2004).

По сравнению с европейской частью России объекты историко-культурного наследия на территории Сибири еще 10 лет назад были изучены слабо (Мыглан, 2012). Впервые в Западной Сибири датированы постройки русского города Мангазеи (Шиятов, 1972). Однако в последние годы работ, посвященных датированию сибирских памятников, становится больше. Так, определены даты строительства исторических объектов в Омской области (Sidorova et al., 2019), Иркутской области (Myglan et al., 2010; Мыглан и др., 2010; Voronin, 2010), Якутии (Myglan et al., 2009) и др. Работа по историческим памятникам активно ведется в Красноярском крае, где существует одна из сильнейших школ дендрохронологов в России и мире «Сибирская дендрохронологическая лаборатория» Сибирского федерального университета.

В Забайкалье подобные исследования представлены единичными публикациями (Сидорова и др., 2018).

Помимо датирования объектов, результатом перечисленных работ является создание региональных шкал для перекрестной датировки плавающих хронологий архитектурной и археологической древесины. В данном отношении в Забайкалье интересен опыт использования сотрудниками Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН полуископаемой древесины, по которой была получена путем перекрестной датировки с живыми деревьями непрерывная древесно-кольцевая хронология в 1190 лет по долине реки Муя. Дендроклиматический анализ показал, что в хронологии содержится сильный климатический сигнал осадков за период с июня предшествующего года по июнь текущего (Воронин и др., 2018).

Байкальский регион на протяжении XVII–XIX столетий стал своеобразной ареной, на которой происходило освоение русскими Забайкалья. В этот период происходит также проникновение буддизма из Центральной Азии и христианства с запада, прибытие старообрядцев, ссылка декабристов и активное хозяйственное освоение территории. В эти столетия активно развиваются торгово-экономические взаимоотношения с Китаем и усиливается роль Троицкосавска, Верхнеудинска (современные г. Кяхта, г. Улан-Удэ) (История Бурятии ..., 2011). Все это отражено в историко-архитектурном наследии, в част-

ности в сибирском деревянном зодчестве. Древесина, содержащаяся в памятниках истории этого периода, может не только стать источником информации о дате, сезоне сруба, его этапах строительства, но и воссоздать динамику климата, а также быт и уклад хозяйствования прошлых столетий. Таким образом, целью данной работы является датировка исторической постройки Забайкалья с помощью дендрохронологического метода.

Материалы и методы

Этнографический музей народов Забайкалья – единственный в Республике Бурятия музей под открытым небом паркового типа (так называемый музей-скансен), на территорию которого перевезены с мест традиционного бытования и восстановлены историко-архитектурные памятники (<https://нашэтномузей.рф/>). Экспозиция музея отражает материальную и духовную культуру народов и этнических групп региона в виде отдельных типов поселений, характерных для народов Забайкалья. Эти типы

поселений составляют комплексы, которые последовательно рассказывают о культурных особенностях этносов, об истории заселения края и этнических процессах, происходивших на данной территории с давних времен до начала XX в. Музей разделен на ряд комплексов: археологический, эвенкийский, бурятский предбайкальский, бурятский забайкальский, старожильский, старообрядческий и городской. Музейный комплекс принят на государственную охрану как памятник федерального значения в соответствии с Указом Президента Российской Федерации № 176 от 20.02.1995.

Объектом изучения выступил так называемый этапный амбар, перевезенный в Этнографический музей из с. Кульский Станок (ст. Кульская, Хоринский район Республики Бурятия) в 1981 г. (рис. 1). Этапный амбар предназначался в первую очередь для ночлега ссыльнокаторжных. Иногда он назывался пересыльной избой или кордоном, этапом (Декабристы..., 1988). Первой транспортной «магистралью», проложенной в Забайка-



Рис. 1. Верстовой столб на месте бывшей ст. Кульская, Хоринский район Республики Бурятия

Fig. 1. A milestone at the site of the former Kul'skaya Station, Khorinsky District of the Republic of Buryatia

лье, стал так называемый Большой Московский (Сибирский) тракт, шедший от Москвы на Дальний Восток и представлявший собою обыкновенную тележную дорогу для гужевого транспорта. Нами была составлена карта-реконструкция исторического участка Московского тракта и ссыльных этапов XIX в. в Забайкалье (рис. 2). Иногда его называли «государева дорога», а буряты – «Улаанай харгы» (буквально – «Красная дорога»). По тракту от Верхнеудинска до Читы действовало 15 станков (станции, по-бурятски «урто»): 1 – Онохойский, 2 – Курбинский,

3 – Шанатский (Шана-урто), 4 – Тарбагатайский (Хахирэ-урто, ныне Удинск), 5 – Кульский (Хулэ-урто, ныне Улан-Одон), 6 – Онинский (Анаа-урто), 7 – Онинский бор (Ониноборск), 8 – Шэбэтэ, 9 – Поперечный, 10 – Погромнинский, 11 – Еравнинский, 12 – Домнинский, 13 – Вершино-Удинский, 14 – Вершино-Кондинский, 15 – Шакшинский. Позднее участок Московского тракта от города Верхнеудинска до Читы был переименован в Читинский тракт. «Этапные» и «полуэтапные» тюрьмы-остроги располагались друг от друга на расстоянии в 15–30 верст –

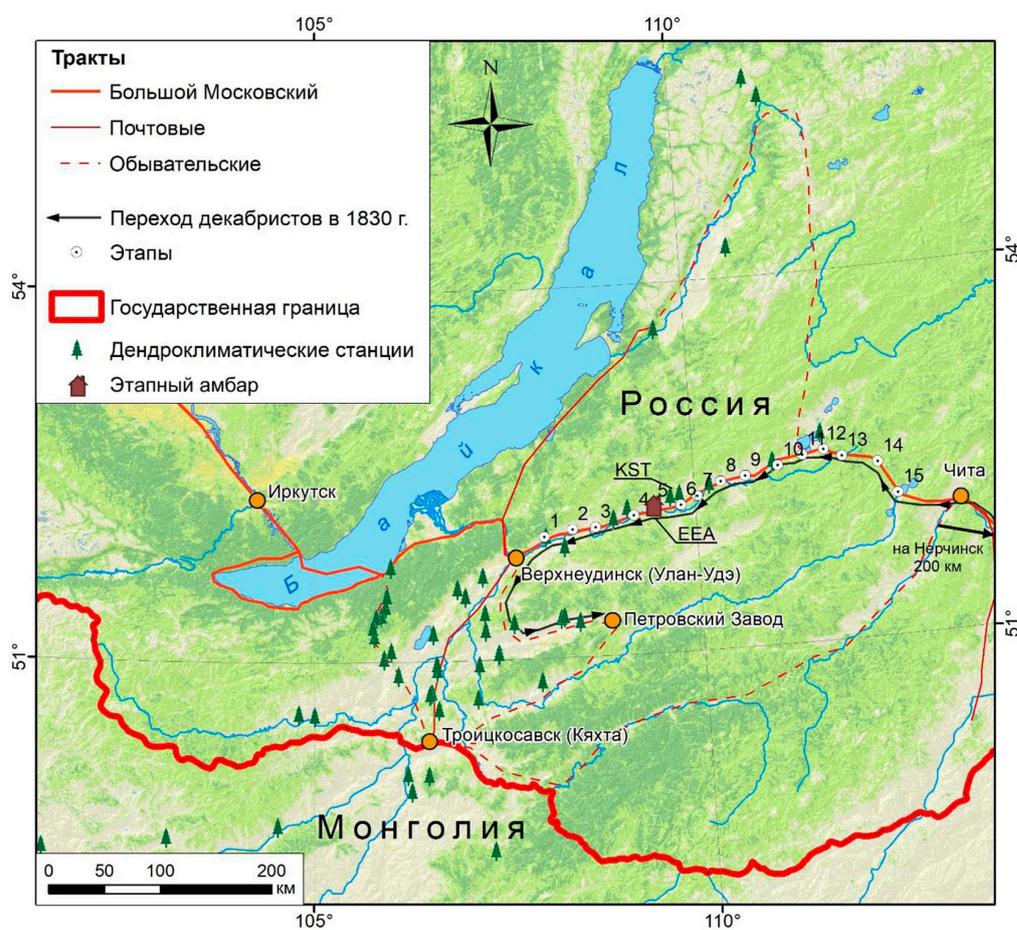


Рис. 2. Карта-схема участка Московского тракта и ссыльных этапов в первой половине XIX в. в Забайкалье и расположение современных дендрохронологических станций

Fig. 2. Map of the Moscow Tract section: the location of exile transit stations in the first half of the 19th century in Transbaikalia and modern dendrochronological stations

именно столько могли пройти закованные в кандалы арестанты за световой день (Гармаева, 2013).

Строение представляет собой шестистенок (прямоугольное в плане здание, разделенное внутренними поперечными стенами на три равные части), рубленный «в обло» из 10 венцов (рис. 3). Два нижних венца вызвали сомнение, так как имели другой оттенок и степень сохранности, что говорило об их поздней замене. Внутренние помещения изолированы, с отдельными выходами на один фасад. Крыша стропильная, вальмовая. Кровля из теса. Над крыльцом, вдоль всего фасада, устроена открытая галерея на стойках под собственной скатной кровлей из теса. Визуальный осмотр позволил определить, что бревна, использованные для строительства этапного амбара, подверглись обтеске. В настоящий момент в здании функционирует выставка «Страницы из истории каторги и ссылки в Забайкалье».

Отбор образцов в виде кернов осуществлялся буравом Пресслера для твердой древесины с внешних и внутренних стен дома, с венцов разного уровня. Старались брать с участков бревен с наименьшей поврежденностью. При отборе образцов затруднение вызвала большая плотность древесины, обусловленная как самой породой дерева (*Larix sibirica*), так и достаточно значительным числом годичных колец. В результате в ряде образцов были разрушены и утеряны последние года. И только один образец был отобран с корой – потолочное перекрытие. Всего было отобрано 40 образцов: 32 – внешняя восточная сторона, 4 – левая камера, 3 – центральная, 1 – потолочное перекрытие (рис. 4).

Полученные отверстия с мест отбора кернов обрабатывались антисептической полимерной смесью, исключаяющей развитие грибков и вредителей, и шпаклевались замазкой под цвет стареющего дерева. Изме-



Рис. 3. Этапный амбар на месте современного нахождения в Этнографическом комплексе «Из истории ссылки и каторги Забайкалья», г. Улан-Удэ

Fig. 3. An exile transit station on the site of its present location in the Ethnographic complex “From the history of exile and hard labor in Transbaikalia”, Ulan-Ude

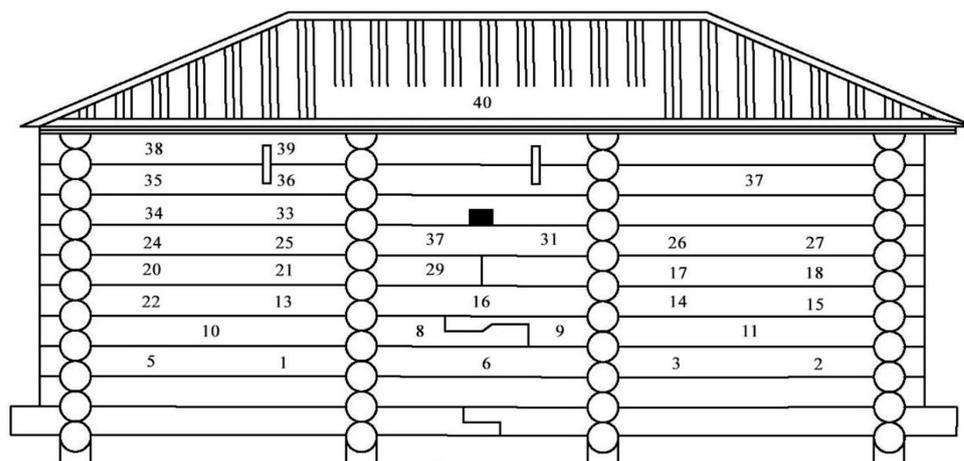


Рис 4. Схема отбора кернов с восточной стены амбара

Fig. 4. Core sampling scheme from the eastern wall of the log station cabin

рение ширины колец проведено на дендрохронологическом оборудовании LINTAB-5 (точность 0,01 мм) с микроскопом Leica S 9D. Полученные ряды ширины колец использованы для датировки памятников с помощью метода перекрестной датировки в программном обеспечении TSAP-Win (Rinn, 1996). Дополнительно статистическую проверку анализа перекрестной датировки проводили в специализированном программном пакете COFENHA (Holmes, 1983). Суть метода заключается в привязке древесных кернов к региональной шкале, которая ранее получена по современным деревьям с известным возрастом. В работе использованы региональные шкалы Западного Забайкалья (Andreev et al., 1999; Гармаев и др., 2017). Программа RCSigFree использовалась для стандартизации, расчета выраженного сигнала популяции EPS, межсерийного коэффициента корреляции и других характеристик хронологии этапного амбара (Melvin, Briffa, 2008).

С конца 90-х гг. XX в. на территории Западного Забайкалья нами велись дендроклиматические работы по сосне обычно-

венной (*Pinus sylvestris*), лиственнице сибирской (*Larix sibirica*) и сосне сибирской (*Pinus sibirica*) (см. рис. 2). Были получены модели реконструкции осадков, уровня оз. Байкал, расходов воды. Также проведено историческое сопоставление событий (наводнения, пожары) для территории исследований. Расширив исследования по всему бассейну р. Селенга и бассейну р. Баргузин (что составляет 93 % площади водосбора оз. Байкал), мы выявили, что у деревьев сохраняется высокая связь между хронологиями на значительном расстоянии (Andreev et al., 1999; Гармаев и др., 2017). Это говорит о том, что здесь возможно выделить региональный лимитирующий фактор, охватывающий засушливые территории Монголии, лесостепную зону Бурятии и таежную прибайкальскую зону. Возраст полученных локальных древесно-кольцевых хронологий по живым деревьям составляет 250–300 лет, что позволяет датировать древесину с середины XVIII в., т.е. большинство из сохранившихся памятников деревянного зодчества русского времени, а также буддийские храмы на территории Бурятии.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного дендрохронологического анализа выявлено, что средний возраст образцов древесных кернов составил 184 года. Длина самой короткой и длинной

хронологий составили 96 и 284 года соответственно (табл. 1). Перекрестная датировка индивидуальных хронологий показала наличие высокой межсерияльной корреляционной связи (средний $r = 0,73$, табл. 1), что позволило

Таблица 1. Характеристика дендрохронологических образцов этапного амбара

Table 1. Characteristics of dendrochronological samples of the log station cabin

Номер образца	Год внутреннего кольца	Год периферийного кольца	Длина образца	Межсерияльный коэффициент корреляции	Коэффициент чувствительности
1	2	3	4	5	6
1	1556	1813	258	0,75	0,29
2	1595	1818	224	0,69	0,24
3	1641	1809	169	0,79	0,23
4	1573	1799	227	0,78	0,29
5	1539	1813	275	0,62	0,19
6	1566	1811	246	0,58	0,27
7	1597	1822	226	0,68	0,29
8	1632	1803	172	0,80	0,29
9	1558	1752	195	0,85	0,32
10	1530	1799	270	0,67	0,36
11	1641	1801	161	0,72	0,30
12	1628	1807	180	0,76	0,29
13	1628	1804	177	0,77	0,33
14	1605	1817	213	0,79	0,32
15	1606	1817	212	0,81	0,30
16	1635	1808	174	0,70	0,29
17	1637	1814	178	0,72	0,22
18	1630	1817	188	0,66	0,22
19	1572	1766	195	0,78	0,34
20	1676	1809	134	0,76	0,24
21	1666	1804	139	0,65	0,22
22	1499	1782	284	0,68	0,27
23	1601	1735	135	0,71	0,29
24	1610	1809	200	0,74	0,38
25	1605	1791	187	0,73	0,33
26	1658	1806	149	0,77	0,30
27	1629	1785	157	0,77	0,31
28	1656	1813	158	0,72	0,36
29	1596	1815	220	0,85	0,35
30	1591	1727	137	0,84	0,27

Продолжение табл. 1

Continuation of the Table 1

1	2	3	4	5	6
31	1663	1816	154	0,76	0,33
32	1663	1825	163	0,77	0,35
33	1583	1678	96	0,66	0,27
34	1578	1677	100	0,68	0,30
35	1652	1828	177	0,78	0,41
36	1639	1828	190	0,80	0,40
37	1694	1806	113	0,44	0,26
38	1637	1825	189	0,79	0,25
39	1617	1812	196	0,77	0,28
40	1678	1828	151	0,51	0,29

построить обобщенную древесно-кольцевую хронологию ЕЕА. Керн из потолочного перекрытия единственный среди всех образцов имел наличие коры, а значит, периферийное кольцо соответствует году рубки дерева, который можно принять за год строительства здания. Так как образец с потолочного перекрытия имел низкую корреляцию с обобщенной хронологией по амбару, нами в дальнейшем были отобраны и обработаны дополнительные образцы с венцов 9 и 10, располагающихся на самых верхних ярусах строения. Данные хронологии позволили выявить ложное кольцо в потолочной балке, приведшее к нестыковке в процессе перекрестной датировки.

Следующим этапом стало сравнение с индексами прироста обобщенных хронологий Забайкалья, которое показало их тесную связь с хронологией ЕЕА на расстояние около 300 км. Здесь остановимся на перекрестной датировке с близлежащей хронологией по живым деревьям KST, находящейся в долине р. Уда (см. рис. 2). Период перекрытия составил 129 лет – с 1700 по 1828 г., коэффициент $G_{lk} = 69$ (значимость 0,01 %), корреляция Пирсона – 0,48, $t = 6,2$. Невысокое значение коэффициента корреляции между

хронологией по живым деревьям и этапному амбару обусловлено нарушением синхронности прироста с 1700 по 1730 г. (рис. 5). Это, в свою очередь, вызвано малой обеспеченностью деревьями хронологии KST в данный период. KST построена по образцам 15 деревьев (*Pinus sylvestris*), длина хронологии 299 лет (1700–1998), $EPS > 0,85$ с 1792 г. Тем не менее согласованная динамика KST и ЕЕА после 1730 г. позволяет говорить о надежности полученных датировок древесных образцов исследуемого строения. Коэффициент корреляции за период с 1730 по 1828 г. составил 0,63.

Периферийные кольца образцов № 35, 36 (венец 9) и 40 (потолочная балка) датируются одним годом, который принят вероятным годом сруба деревьев для этапного амбара, – 1828 г. Поскольку периферийные кольца были полностью сформированными, то периодом заготовки древесины можно считать ноябрь 1828 г. – март 1829 г., что согласуется с традицией заготавливать материалы для строительства в зимнее время. Возможно, само здание возводилось в 1829 г., хотя есть допущение, что в связи со срочной необходимостью размещения каторжан было необходимо

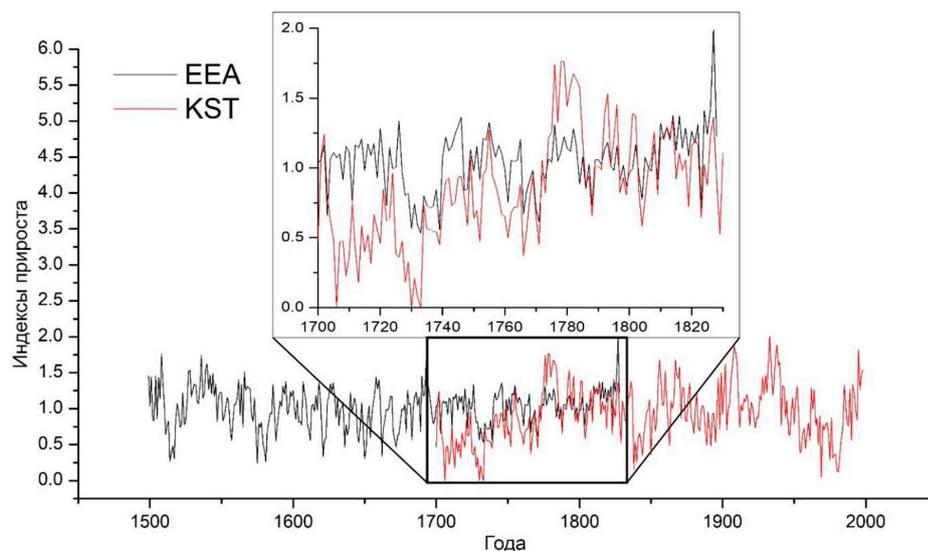


Рис. 5. Перекрестная датировка хронологии EEA, построенной по древесным образцам этапного амбара, с хронологией KST по живым деревьям, позволившая определить дату последнего кольца

Fig. 5. Cross-dating of the EEA chronology based on wood samples from the log station cabin with the KST chronology based on living trees allowed us to determine the date of the last ring

обустроить место их содержания в пути еще в 1828 г.

По нашей оценке, бревна этапного амбара, подвергнутые обтеске в некоторых случаях на 0,5–2 см наружного слоя утратили 10–50 лет, в среднем 30 лет. Другие венцы с наиболее ранними датами – это образцы с утерянной древесиной, подвергнутые процессу гниения (рис. 6). Часть образцов могла подвергнуться смятию при отборе приростным буровом, с чем столкнулись исследователи при работе со Спасской церковью из Зашиверска (Mygland et al., 2009). Данная проблема решается использованием буров для исторической древесины или отбором спилов, последнее, однако, не всегда допустимо, поскольку многие объекты имеют охранный статус. В подобных исследованиях в случае возможности отбора спилов необходимо воспользоваться ею.

В учетных показателях Этнографического музея указано приблизительное время сооружения постройки – сер. XIX в. Таким

образом, дендрохронологический метод позволил уточнить год постройки амбара, который оказался на два десятка лет старше существующей оценки. Дендрохронологический материал, собранный с этапного амбара, позволил существенно продлить региональную шкалу и на ее основе получить в дальнейшем новую информацию о цикличности режима увлажнения в бассейне оз. Байкал. Для ее продления в период 1700–1730 гг., когда наблюдается расхождение динамики прироста, можно использовать ряд по исследуемой исторической древесине, обеспеченный необходимым количеством индивидуальных серий. Впрочем, нами запланированы работы по уточнению и корректировке данного рассогласования на основе дополнительных материалов по памятникам и живым деревьям. Самый возрастной образец продлил референтную хронологию на 200 лет, до 1499 г. (518 лет). Для климатических реконструкций обобщенная хронология пригодна с 1556 г, после

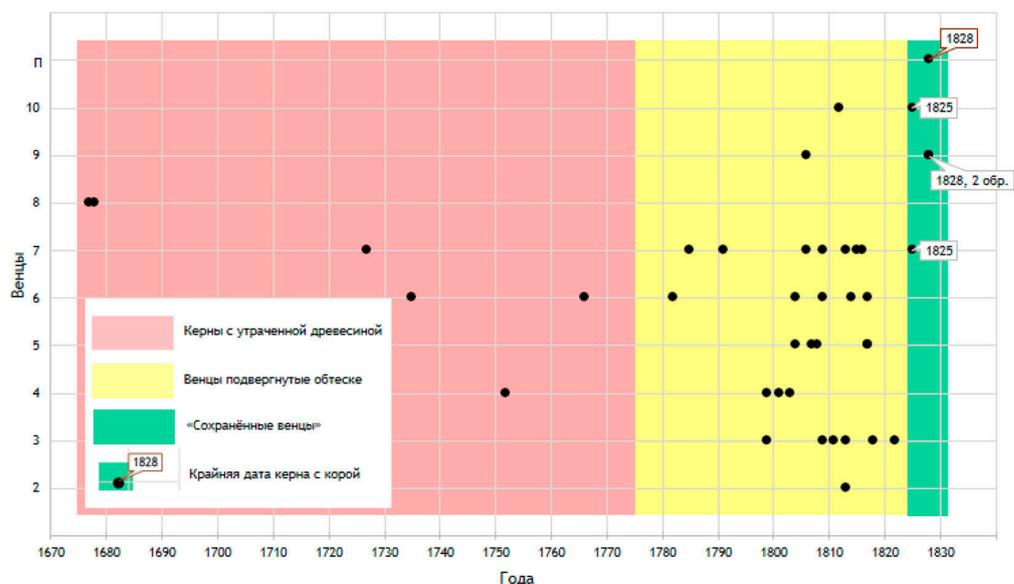


Рис. 6. Распределение крайних дат по венцам: с утраченной древесиной, подвергнутых обтеске, и «сохранённые» венцы

Fig. 6. Distribution of extreme dates by crowns: with lost wood, trimmed and “preserved” crowns

которого выраженный сигнал популяции становится больше 0,85.

Год постройки этапного амбара интересен тем, что ранее он не охватывал период ссылки декабристов, имея лишь приблизительную дату постройки – середина XIX в. В конце января 1827 г. из Санкт-Петербурга в Читинский острог прибыли первые четыре декабриста, потом сюда были отправлены остальные офицеры-декабристы, до этого содержавшиеся в казематах Петропавловской и Шлиссельбургской крепостей. В сентябре в Читу были переведены и декабристы из Благодатского рудника. Всего к концу 1827 г. в Чите было 84 декабриста. Следующим этапом в 1830 г. стал их перевод двумя отрядами пешком в кандалах из Читинского острога на горные рудники Петровского завода (см. рис. 1). В 1830–1839 гг. в Петровском Заводе отбывал каторгу 71 декабрист. Таким образом, можно предположить, что амбар был построен специально для этапирования

декабристов и затем использовался для простых каторжан.

На фоне известных случаев российско-го казнокрадства, изготовление тюремных помещений шло с нарушением норм, и уже до первых арестантов протекала крыша, а зимой заносило снегом (Гессен, 1976). Однако, судя по современному состоянию этапного амбара из села Улан-Одон (Кульский Станок), хоринские буряты, отвечавшие за его постройку, весьма добросовестно соорудили это здание и следили за его состоянием, которое простоит еще сотни лет.

Заключение

В Республике Бурятия на государственной охране состоят 245 деревянных объектов культурного наследия и для более 70 % памятников неизвестны точные даты их создания. Также вызывает озабоченность нынешнее состояние объектов историко-культурного наследия Забайкалья, которое

неизбежно ухудшается в результате пожаров, воздействия внешней среды, человека и других факторов. Поэтому актуальной задачей является создание базы данных, содержащей информацию о датах строительства памятников деревянного зодчества, и сохранение природной летописи, заключенной в древесных кольцах, тем более что на сегодняшний день безвозвратно утрачено 28 объектов культурного наследия с момента их постановки

на учет. В свете вышеизложенного полученные результаты датировки Этапного амбара вносят вклад в развитие междисциплинарного подхода к изучению многочисленных памятников Забайкалья. В дальнейшем планируется провести ряд исследований не только объектов деревянного зодчества региона, но и предметов и сооружений, составляющих культурную и историческую ценность народов Забайкалья.

Список литературы / References

Воронин В. И., Осколков В. А., Буянтуев В. А., Мориц Р. С., Швецов С. Г. (2018) 1190-летняя реконструкция атмосферных осадков в долине реки Муя (Респ. Бурятия) на основании древесно-кольцевой хронологии с использованием полуископаемой древесины лиственницы Гмелина. *Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: Enviromis-2018*. Томск, Томский центр научно-технической информации, с. 15–19 [Voronin V. I., Oskolkov V. A., Buyantuev V. A., Moritz R. S., Shvetsov S. G. (2018) The 1190-year-old reconstruction of atmospheric precipitation in the Muya river valley (Republic of Buryatia) on the basis of a tree-ring chronology using semi-fossil larch Gmelin wood. *International conference and early career scientists school on environmental observations, modeling and information systems: Enviromis-2018*. Tomsk, Tomsk Center for Scientific and Technical Information, p. 15–19 (in Russian)]

Гармаев Е. Ж., Цыдыпов Б. З., Дабаяева Д. Б., Андреев С. Г., Аюржанаев А. А., Куликов А. И. (2017) Уровенный режим озера Байкал: ретроспектива и современное состояние. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, 2: 4–18 [Garmayev E. Z., Tsydyrov B. Z., Dabayeva D. B., Andreyev S. G., Ayurzhanayev A. A., Kulikov A. I. (2017) The Lake Baikal level regime: retrospection and current status. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management* [Vodnoe hozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie], 2: 4–18 (in Russian)]

Гармаева Т. Ф. (2013) *О чем поведал старый тракт... (историческое повествование)*. Иркутск, Типография ООО «Принт-Лайн», 234 с. [Garmaeva T. F. (2013) *What the old tract told about ... (a historical narration)*. Irkutsk, LLC Printing house "Print-Line", 234 p. (in Russian)]

Гессен А. И. (1976) *Во глубине сибирских руд: Декабристы на каторге и ссылке*. Москва, Детская литература, 351 с. [Gessen A. I. (1976) *In the depths of Siberian ores: Decembrists in hard labor and exile*. Moscow, Detskaya literatura, 351 p. (in Russian)]

Декабристы. Биографический справочник (1988) Нечкина М. В. (ред.) Москва, Наука, 448 с. [Decembrists. *Biographical reference*. (1988) Nechkina M. V. (ed.) Moscow, Nauka, 448 p. (in Russian)]

История Бурятии: в 3 т. Т. 2. XVII-начало XX в. (2011) Базаров Б. В. (ред.) Улан-Удэ, Изд-во БНЦ, 624 с. [History of Buryatia: in three volumes. Vol. 2. XVII-early XX century (2011) Bazarov B. V. (ed.) Ulan-Ude, BSC, 624 p. (in Russian)]

Колчин Б. А. (1962) Дендрохронология Новгорода. *Советская археология*, 1: 113–139 [Kolchin B. A. (1962) Dendrochronology of Novgorod. *Soviet Archaeology* [Sovetskaya arkheologiya], 1: 113–139 (in Russian)]

Кулакова М. И. (2006) Дендрохронологическое изучение дерева Казанских раскопов в Пскове. *Краткие сообщения института археологии*, 220: 143–147 [Kulakova M. I. (2006) Dendrochronological investigation of timber from the Kazansky excavation areas in Pskov. *Brief Communications of the Institute of Archaeology* [Kratkiye soobshcheniya Instituta arkheologii], 220: 143–147 (in Russian)]

Мыглан В. С. (2012) *Историко-культурные процессы в Сибири в контексте климатических изменений по данным археологии, дендрохронологии и истории (XVII–XIX вв.): автореф. дис. ... д-ра истор. наук*. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 37 с. [Mylgan V. S. (2012) *Historical and cultural processes in Siberia in the context of climatic changes based on archeological, dendrochronological and historical studies (XVII–XIX centuries): executive summary of dissertation for the degree of Doctor of historical sciences*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 37 p. (in Russian)]

Мыглан В. С., Жарников З. Ю., Майничева А. Ю., Лыхин Ю. П. (2010) Результаты дендрохронологического обследования Братского острога. *Российская археология*, 3: 164–168 [Mylgan V. S., Zharnikov Z. Yu., Mainicheva A. Yu., Lykhin Yu. P. (2010) The Bratsky ostrog, results of the dendrochronological survey. *Russian Archaeology* [Rossijskaja arheologija], 3: 164–168 (in Russian)]

Сидорова М. О., Жарников З. Ю., Вахнина И. Л., Мыглан В. С. (2018) Дендрохронологическое датирование г. Читы: дом С. А. Шиллинга. *Евразия в кайнозое. Стратиграфия, палеоэкология, культуры*, 7: 322–328 [Sidorova M. O., Zharnikov Z. Yu., Vakhnina I. L., Mylgan V. S. (2018) Dendrochronological dating of Chita: S. A. Shilling's house. *Eurasia in the Cenozoic. Stratigraphy, Paleoeology, Cultures* [Evraziya v kajnozoe. Stratigrafiya, paleoekologiya, kul'tury], 7: 322–328 (in Russian)]

Тарабардина О. А. (2005) Дендрохронологические исследования в Новгороде в 1995–2003 гг. *Археология и естественнонаучные методы*. Черных Е. Н., Завьялов В. И. (ред.) Москва, Языки славянской культуры, с. 82–91 [Tarabardina O. A. (2005) Dendrochronological research in Novgorod in 1995–2003. *Archaeology and natural science research methods*. Chernykh E. N., Zavyalov V. I. (eds.) Moscow, Languages of the Slavic culture, p. 82–91 (in Russian)]

Черных Н. Б., Карпукхин А. А. (2004) Абсолютная дендрохронологическая шкала Твери XI – начала XX вв. *Российская археология*, 3: 68–78 [Chernykh N. B., Karpukhin A. A. (2004) The Tver' absolute dendrochronological scale in the 11th–the early 20th centuries. *Russian Archaeology* [Rossijskaja arheologija], 3: 68–78 (in Russian)]

Шиятов С. Г. (1972) Дендрохронология Мангазеи. *Проблемы абсолютного датирования в археологии*. Москва, Наука, с. 119–121 [Shiyatov S. G. (1972) Dendrochronology of Mangazeya. *Problems of absolute dating in archeology*. Moscow, Nauka, p. 119–121 (in Russian)]

Andreev S. G., Vaganov E. A., Naurzbaev M. M., Tulokhonov A. K. (1999) Registration of long-term variations in the atmospheric precipitation, Selenga river runoff, and lake Baikal level by annual pine tree rings. *Doklady Earth Sciences*, 368: 1008–1011

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

Karpukhin A. A. (2009) Absolute dendrochronological scales of archaeological sites in European Russia. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 37(1): 62–70

Melvin T.M., Briffa K.R. (2008) A ‘signal-free’ approach to dendroclimatic standardization. *Dendrochronologia*, 26(2): 71–86

Myglan V. S., Slusarenko I. Y., Mainicheva A. Y. (2009) The Church of the Saviour from Zashiversk: the dendrochronological aspect. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 37(3): 103–110

Myglan V. S., Zharnikov Z. Yu., Mainicheva A. Yu., Lykhin Yu.P. (2010) Ilimsk Ostrog: its historical and dendro-chronological aspects. *Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences*, 3(1): 43–52

Rinn F. (1996) *TSAP V3.5: Computer program for tree-ring analysis and presentation*. Heidelberg, Frank Rinn Distribution, 269 p.

Sidorova M.O., Zharnikov Z. Yu., Tataurov S.F., Tataurova L.V., Myglan V.S. (2019) Dendrochronological dating of archaeological objects of Tara areal in the Irtysh region (Omsk region). *Rossijskaja Arheologija*, 2: 134–144 (in Russian)

Voronin V.I. (2010) Dendrochronological dating of the groundsill for the bell tower of the Spasskaya Church in Irkutsk. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 38(1): 78–82