

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 fluvioglacial 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. Актуру (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 скучны и разрознены. 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. Актуру (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. Актуру 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, годичные 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. Актуру (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 считают одной из причин увеличения их частоты и интенсивности (Falk et al., 2011; O'Connorg 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 (Фуряев, 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 древостоеv: 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 Актуру (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, вышеупомянутой 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. Актуру, 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 кедрами (Сапожников, 1949), недавних – микроугольки в образцах из подстилки, мхов и лишайников (Бляхарчук и др., 2022).

Цель исследования – дендроиндикационное выявление и датирование прошлых пожаров в лесах верховьев р. Актуру (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. Актуру в пределах горно-ледникового бассейна площадью около 40 км² расположены на северном макросклоне Северо-Чуйского хребта (Горный Алтай). Слоны 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 Актуру ($50^{\circ}04'$ с.ш., $87^{\circ}45'$ в.д., 2150 м над ур.м., 1958–1994 гг.), характеризуется относительно низкими зимними (минус 17,2–18,6 °C) и летними (7,7–9,6 °C) 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. Актуру (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) формирующими лесами на молодых моренах ледников на высотах 1990–2350 м над ур.м., а также (5) группами и одиночными деревьями в лесотундре в 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 подсушки 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-

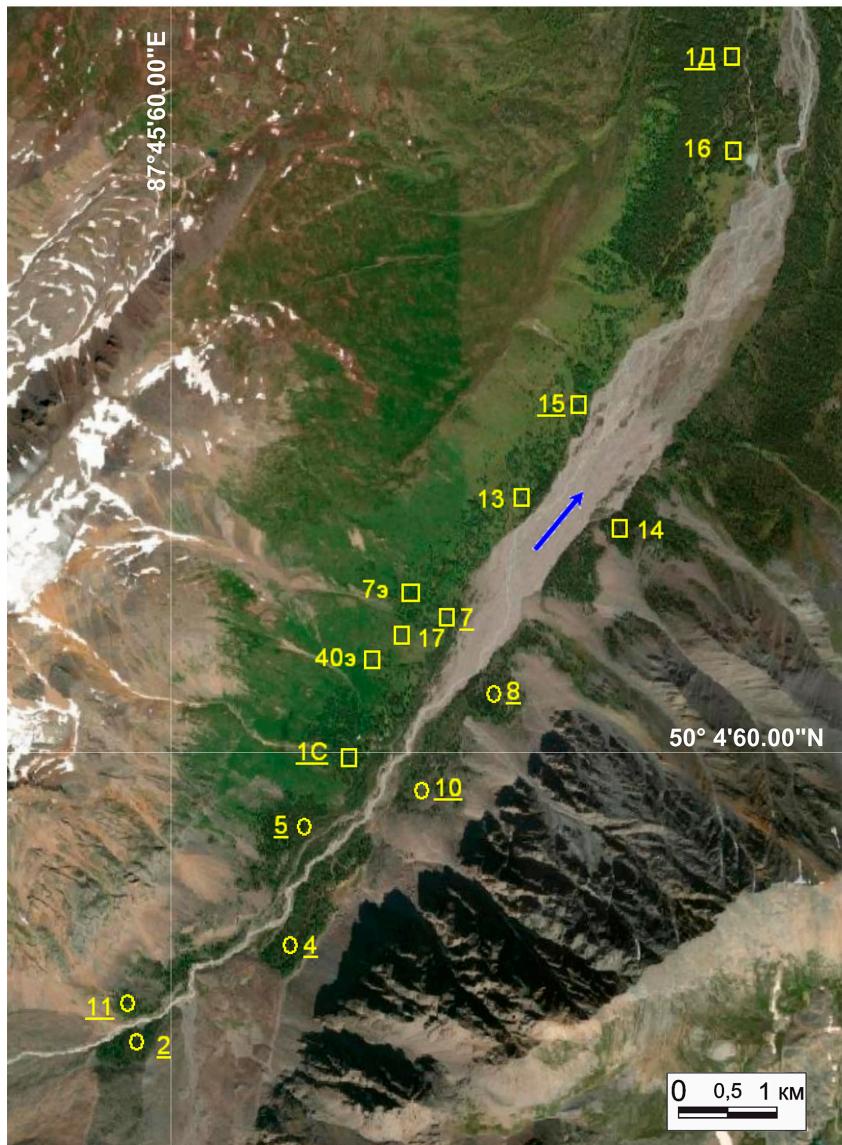


Рис. 1. Спутниковое изображение верховьев р. Актуру. Указаны номера пробных площадей в старовозрастных (кружки) и пройденных пожарами (квадратики) лесах. Подчеркнутый номер пробной площади означает, что там имеются почвенные или геоморфологические разрезы. Не обозначены: ПП-5п (поврежденный пожаром фрагмент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

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 гарях, вейник тупоколосковый (*Calamagrostis obtusata* Trin.) на более поздних этапах лесовосстановительного процесса, спирея извилистая (*Spiraea 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. Актуру

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 Актуру)	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 структуры древостоев и динамики 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 перечет древостоя и подроста; отобраны живые деревья как без признаков, так и с признаками (пожарные подсушкины, 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 Актуру (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 приrostы в высоту. Ширина годичных 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 Актуру (1958–1994 гг.).

Дендроиндикационные методы и маркеры

Для выявления и датирования прошлых пожаров применяли комплекс дендроиндикационных методов: травматические (маркеры – подсушкины, 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 подсушкины 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 подсушкины 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 (подсушкины) отнесены травмы на кернах, прошедших через первую и вторую зоны, ко второй (шрамы) – через

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

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

№ ПП	Годы обследования	Количество		
		обследованных деревьев	древесных образцов	годичных 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 годичных 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 (*Preudotsuga 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 подсушки при застаниии 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 предлагаются 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. Актуру, были принятые 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. Актуру

Пирогенные травмы. Подсушина на кернах выглядела как прекратившая рост древесина, которая через ряд лет с отсутствующими кольцами могла быть продолжена новой древесиной. Ее цвет в районе подсушки был (1) серый в центре подсушки, (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 кернах только в одном случае удалось четко зафиксировать положение шрама в середине ранней древесины. Кроме того, на кернах 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 годичные 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-

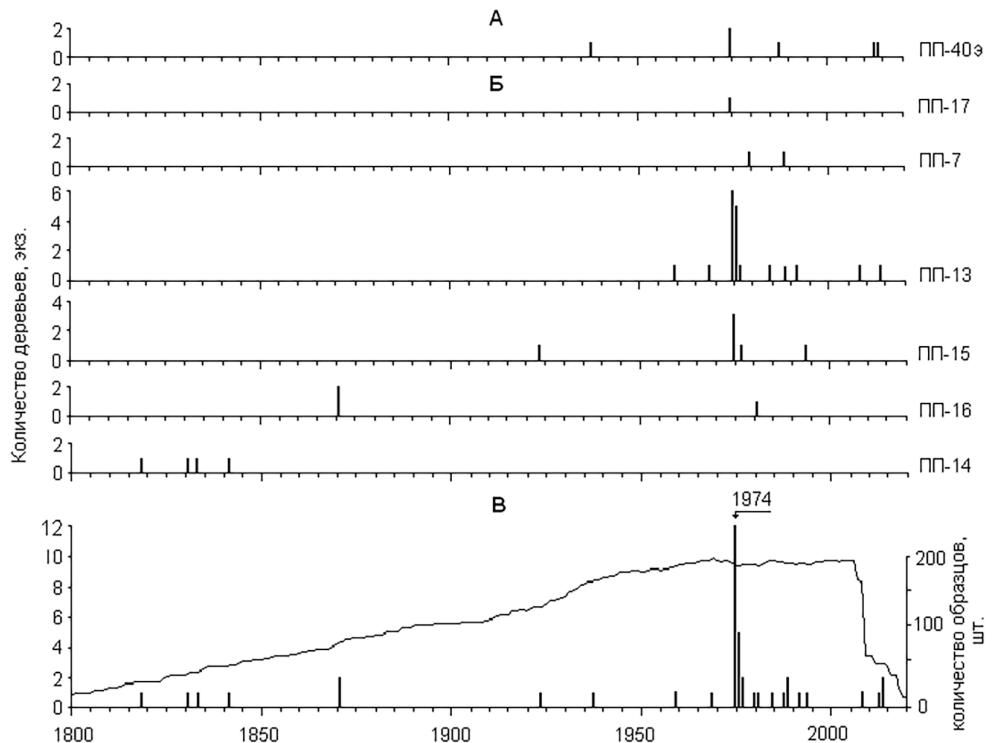


Рис. 2. Количество деревьев кедра и лиственницы с пирогенными травмами в пройденных пожарами лесах на верхней границе (A), в лесном поясе (Б) и по всем участкам леса (B) в верховьях р. Акту. Шрам 1797 г. (ПП-13) не отражен на гистограмме. Стрелкой отмечен год наибольшего отклика деревьев (год события).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

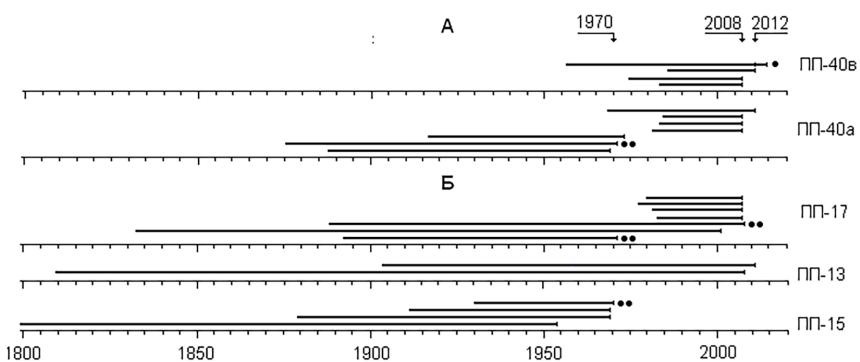


Рис. 3. Годы гибели деревьев в пройденных пожарами лесах на верхней границе (A) и в лесном поясе (Б) в верховьях р. Акту. Одним кружком отмечены деревья, которые продолжали после события образовывать годичные кольца только по одному радиусу, двумя – по двум измеренным радиусам древесины. Остальные обозначения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

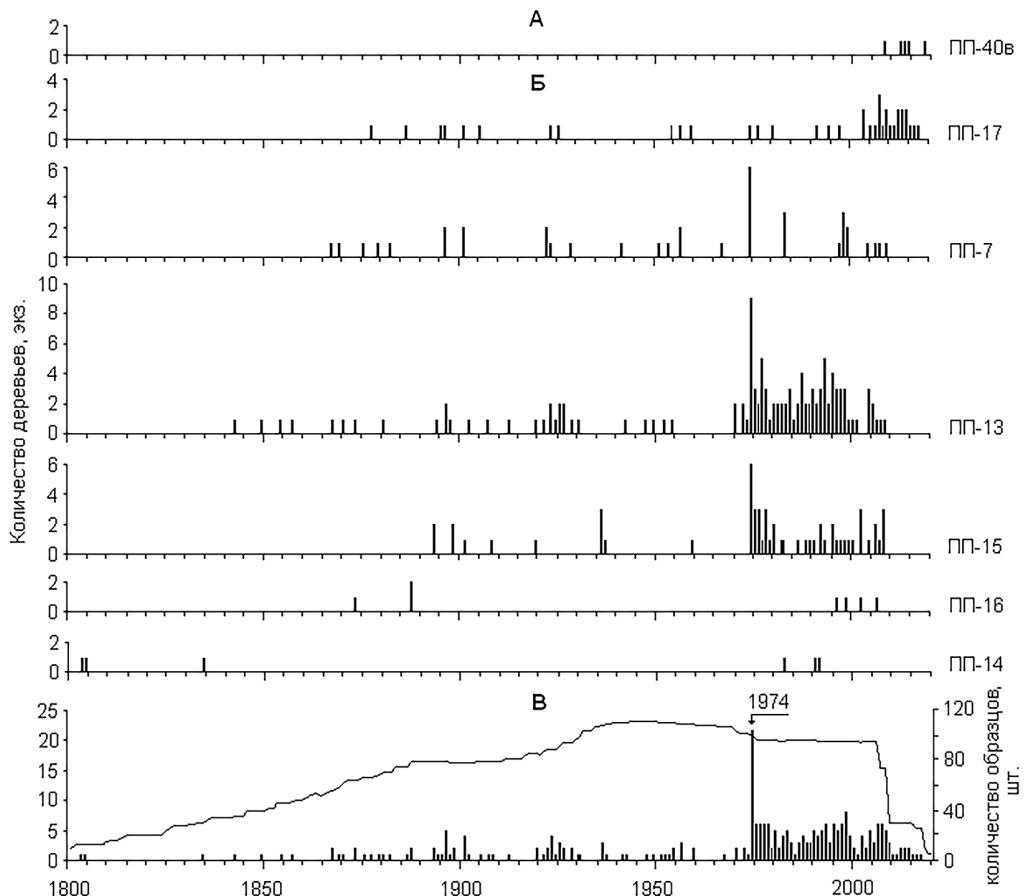


Рис. 4. Количество деревьев лиственницы с травматическими смоляными ходами в пройденных пожарами лесах на верхней границе (A), в лесном поясе (Б) и по всем участкам леса (В) в верховых р. Актуя. Остальные обозначения см. на рис. 2

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 серединой 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 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. Акту пройденные пожарами древостоя 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 оказалось 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-

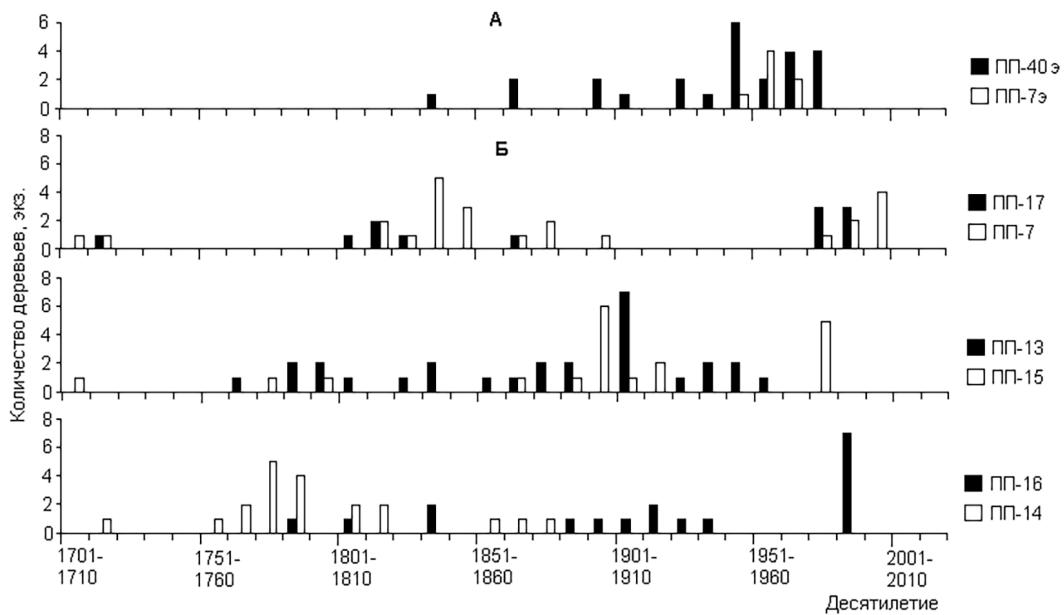


Рис. 5. Время появления модельных деревьев в пройденных пожарами лесах на верхней границе (A) и в лесном поясе (Б) в верховьях р. Акту. Остальные обозначения см. на рис. 2

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 correspondовало 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 высказанное, 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 лиственничнице (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

пришли 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 радиоуглеродным 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 подсушки, 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. Актуру

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 – подсушки, шрамы, травматические смоляные ходы, резкие и долговременные изменения прироста, отсутствующие и сильно засмоленные кольца. Сухостой погибшего в этот год подроста 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 подроста (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 ×400) во всех образцах подстилки, мхов и лишайников, собранные в июле 2012 г. в верховьях р. Актуру (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 (подсушки и шрамы), травматических смоляных ходов, резких и продолжительных снижений прироста. На 1974 г. приходятся 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. Актуру 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. приходятся 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. Актуру 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. Акту соотвествуют периодам потеплений, выявленным по динамике хода реконструированной летней температуры (Timoshok et al., 2016), которые, скорее всего, сопровождались длительными засушливыми периодами. Учитывая вышеизложенное, можно с уверенностью утверждать, что крупные пожары 1974 г. и конца XIX в., охватившие большие территории Сибири, в том числе верховья р. Акту, были вызваны экстремальными погодно-климатическими изменениями.

Заключение

В этом исследовании был проверен ряд дендроиндикационных маркеров на пригодность датирования пожаров в верховьях р. Акту: пирогенные травмы ствола (подсушки, 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) отсроченный 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. Акту (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 сто лет. 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. Акту (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*. Saabrucken, LAP Lambert Academic Publ., 212 c. [Bocharov A. Yu. (2011) *High-mountain forests in the central Altai Mountains. Taxation structure and radial growth*. Saabrucken, 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 Aziatskoi 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., Patsukovich 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., Kocheeva N. A. (2011) *Thunderstorm and lightning forest fires in Altai Republic*. Gorno-Altaisk, Gorno-Altaisk 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*. Saabrucken, LAP Lambert Academic Publ., 160 c. [Kopysov S. G. (2011) *Landscape hydrology of geosystems of the forest belt in the central Altai Mountains*. Saabrucken, 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 Актура (Горный Алтай). *ГеоРиск*, 2: 62–69 [Nikolaeva S. A., Savchuk D. A., Kuznetcov 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., Саэта 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. Актура (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 Altay). *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., Наурзбаев 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., Kirdyanov 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