

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/14>

УДК 630*561.24+551.583(470.56)+ 630.181



Влияние климата на возрастную структуру древостоев в экотоне северной границы леса на полуострове Ямал

Варвара А. Бессонова✉, bessonova-varechka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9433-169X>

Владимир В. Кукарских, voloduke@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6552-1726>

Надежда М. Дэви, nadya@ipae.uran.ru <https://orcid.org/0000-0002-3756-4761>

Иван А. Сурков, surkov_va@list.ru <https://orcid.org/0009-0008-0326-7903>

Александр Ю. Сурков, surkov_au@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-2429-6815>

Людмила А. Горланова, gorlanova@ipae.uran.ru <https://orcid.org/0000-0002-1400-821X>

Рашид М. Хантемиров, rashit@ipae.uran.ru <https://orcid.org/0000-0003-3033-8312>

Институт экологии растений и животных УрО РАН, ул. 8-Марта, 202, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация

На полуострове Ямал в пределах экотона северной границы древесной растительности изучена пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ. В работе представлены результаты исследования 12 пробных площадей и более 1000 деревьев лиственницы сибирской и ели сибирской. На основе перекрестно-датированных древесно-кольцевых хронологий получены данные о возрастной структуре древостоев и их динамике за последние 150 лет. Динамические процессы в древостоях экотона северной границы леса наиболее выражены в редколесьях, где в середине XX века произошло резкое увеличение густоты древостоев. Корреляционный анализ частоты появления особей с инструментальными наблюдениями за климатическими переменными показал, что на выживание новых особей лиственницы и ели в различных типах древостоя в значительной степени влияет количество осадков июня – августа.

Ключевые слова: экотон северной границы леса, лиственница сибирская, ель сибирская, изменения климата, лесотундровые сообщества, полуостров Ямал

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-14-00330.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние климата на возрастную структуру древостоев в экотоне северной границы леса на полуострове Ямал / В. А. Бессонова, В. В. Кукарских, Н. М. Дэви, И. А. Сурков, А. Ю. Сурков, Л. А. Горланова, Р. М. Хантемиров // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 5–22. – Библиогр.: с. 16–21 (40 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/14>.

Поступила 08.11.2023 Пересмотрена 21.12.2023 Принята 26.12.2023 Опубликовано онлайн 16.01.2024

Climatic influence on the age structure of tree stands in ecotone of the northern treeline on the Yamal Peninsula

Varvara A. Bessonova✉, bessonova-varechka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9433-169X>

Vladimir V. Kukarskih, voloduke@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6552-1726>

Nadezhda M. Devi, nadya@ipae.uran.ru <https://orcid.org/0000-0002-3756-4761>

Ivan A. Surkov, surkov_va@list.ru <https://orcid.org/0009-0008-0326-7903>

Alexander Yu. Surkov, surkov_au@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-2429-6815>

Ludmila A. Gorlanova, gorlanova@ipae.uran.ru <https://orcid.org/0000-0002-1400-821X>

Rashit M. Hantemirov, rashit@ipae.uran.ru <https://orcid.org/0000-0003-3033-8312>

Institute of Plant and Animal Ecology, 8-Marta str., 202, Yekaterinburg city, 620144, Russian Federation

Abstract

The spatial and temporal dynamics of forest-tundra communities was studied on the Yamal Peninsula within the northern treeline ecotone. The paper presents the results of surveying 12 sample plots and more than 1000 trees of Siberian larch and Siberian spruce. Based on cross-dated tree-ring chronologies, the age structure and dynamics of stands for the last 150 years were obtained. Dynamic processes in stands of the northern treeline ecotone are most pronounced in the sparse forests, where there has been a sharp increase in stand density since the middle of the 20th century. Correlation analysis of tree establishment time with instrumental observations of climatic variables showed that the establishment of new larch and spruce individuals in different stand types is significantly influenced by the amount of precipitation in June-August.

Keywords: *northern treeline ecotone, Siberian larch, Siberian spruce, climate change, forest-tundra communities, Yamal Peninsula*

Funding: This study has been supported by the grant the Russian Science Foundation, RSF № 21-14-00330.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: authors declare no conflict of interest.

For citation: Bessonova V. A., Kukarskih V. V., Devi N. M., Surkov I. A., Surkov A. Yu., Gorlanova L. A., Hantemirov R. M. (2023). Climatic influence on the age structure of tree stands in ecotone of the northern treeline on the Yamal Peninsula. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 2, pp. 5-22 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/14>.

Received 08.11.2023. *Revised* 21.12.2023. *Accepted* 26.12.2023. *Published online* 16.01.2024

Введение

В последние десятилетия человечество всерьез задумывается о глобальных вопросах изменения климата, о чем свидетельствуют международные соглашения, такие как рамочный протокол ООН, Киотский протокол и другие. При этом, по данным межправительственной группы экспертов по изменению климата, о глобальном изменении климата свидетельствует, прежде всего, повышение среднегодовой температуры на 1,2 °C по всему земному шару, по сравнению с доиндустриальным периодом [1]. Данные заявления основываются на результатах последних исследований, которые показывают, что повышение температуры в Арктике происходит в четыре раза быстрее, чем в остальной части мира [2]. Одной из основных причин, почему исследование климатических изменений в Арктике так важно, является тот факт, что этот регион является барометром изменений глобального климата -изменения в Арктике могут служить индикатором климатических изменений всей планеты. Повышенный интерес со стороны мирового сообщества дает толчок к развитию фундаментальных исследований в этой области. В частности, исследователи обращают особое внимание на лесные экосистемы, вследствие их огромного хозяйственного значения [3,4]. В ряде работ показано, что изменения климата ведет не только к уязвимости самих лесных экосистем, но и других, зависящих от леса сообществ [5].

Исследование лесных экосистем в Арктике и их ответ на изменения климата в этом регионе играют важную роль в понимании глобальных экологических процессов. Леса северного полушария, включая лесотундру и бореальные леса, представляют собой критически важные компоненты планетарной экосистемы и климата [6]. В настоящее время изучению динамики лесотундровых сообществ на северном и верхнем пределе распространения уделяется повышенное внимание, в связи с изменением общей климатической обстановки и отдельных параметров климата, наблюдаемым повсеместно в

высоких широтах Земли. Исследование динамики экосистем на фоне колебаний климата различного временного масштаба дает возможность выявить основные тренды изменений окружающей среды и использовать их в пространственно-временных реконструкциях для прогноза реакции экосистем на изменения климата в будущем.

Инструментально зафиксированный устойчивый и продолжающийся рост температуры воздуха влияет на функционирование экосистем, в частности приводит к изменению видового состава, пространственного размещения и радиального прироста деревьев [7–9]. В многочисленных работах, посвященных динамическим процессам в экотонах границы леса показана интенсификация процессов лесовозобновления в XX-XXI вв.. Сдвиг верхней и северной границы леса, увеличение сомкнутости и продуктивности древостоев отмечается вдоль всего Уральского хребта [10,11].

Одним из наиболее перспективных районов для изучения реакции биоты на современные изменения климата являются арктические области, в частности полуостров Ямал, где самые северные древостои приурочены к надпойменным террасам речных долин [12]. Данные древостои характеризуются простотой видового состава и практически не испытывают антропогенной нагрузки, что облегчает изучение их климатогенной динамики.

Целью данного исследования было выявление основных факторов, определяющих динамику древостоев в экотоне северной границы леса в долине реки Хадыта-Яха, полуостров Ямал. Конкретными задачами исследования являлись оценка состава, морфологической и возрастной структуры древостоев, восстановление истории формирования лесотундровых сообществ и выявление основных факторов, влияющих на выживание новых особей.

Материалы и методы

Полуостров Ямал расположен в северной части Западной Сибири севернее полярного круга от 68° с. ш. до 73° с. ш. и от 66° в. д. до 73° в. д. (рис. 1).

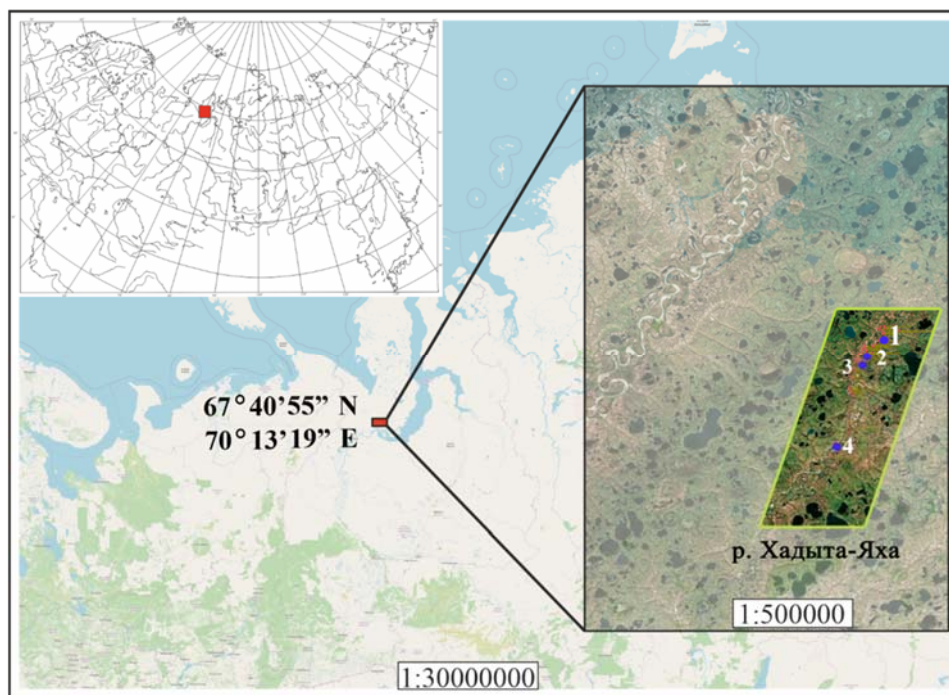


Рисунок 1. Местоположение района исследования (1 – Тундра с одиночными деревьями; 2 – Северная граница лиственничных редколесий; 3 – Северная граница смешанных редколесий; 4 – Северная граница сомкнутых лесов)

Figure 1. Location of the study area (1 – Isolated trees in tundra; 2 – Open larch forest; 3 – Open mixed forest; 4 – Closed forest)

Источник: спутниковые снимки из геоинформационной системы Google Планета Земля

Source: satellite images from the geoinformation system Google Earth

Рельеф Ямала исключительно ровный, перепады высот не превышают 90 м. На всей территории полуострова распространены многолетнемерзлые грунты. Основные типы почв: подбуры, глееземы и торфяные почвы. Природные зоны полуострова представлены тундрой и лесотундрой, которая появляется только в южной части полуострова. Растительность представлена различными типами тундр, лугами и болотами. Лесная растительность приурочена к долинам рек, текущих с севера на юг: Танлова-Яхи, Хадыта-Яхи и Ядаяходы-Яхи. В среднем течении этих рек на надпойменных террасах распространены лиственничные и елово-лиственничные редколесья. Сомкнутые леса имеют островное распространение в долинах нижнего течения указанных рек [13].

В соответствии со схемой климатического районирования Арктики, вся территория Ямала относится к Восточному району Атлантической области [14]. Климат на Ямале – умеренно конти-

нентальный: на юге субарктический, на севере – арктический. Главными факторами, определяющими особенности климата на полуострове, являются омывание холодными водами Карского моря и равнинность рельефа.

Район исследования характеризуется прохладным непродолжительным (65-90 дней) летом и длинной (190-210 дней) холодной зимой с частыми сильными ветрами и метелями. Средние температуры самого холодного месяца – января составляют от – 23 до – 27 °С, а самого теплого – июля – от +3 до +9 °С по данным метеостанций Салехард и Мыс Каменный [15]. В зимний период на полуострове Ямал выражен меридиональный ход изотерм, что свидетельствует о доминировании в это время западного переноса воздушных масс и о частом прохождении циклонов, приходящих с Северной Атлантики. Изотермы летних месяцев идут почти широтно, что связано с преобладанием северных воздушных потоков. Летом на Ямале в отдельные пе-

риоды возможны жаркие дни. Абсолютный максимум температуры воздуха в зоне лесотундры достигает 30°C.

Сумма годовых осадков составляет около 400 мм (рис. 2). Максимум осадков приходится на летние месяцы. Число дней со снежным покровом составляет около 230. Средняя высота снежного покрова составляет около 50 см, но его распределение в значительной мере зависит от особенностей рельефа (от 10-30 см на плоских водоразделах до 80-120 см в долинах рек и котловинах озер).

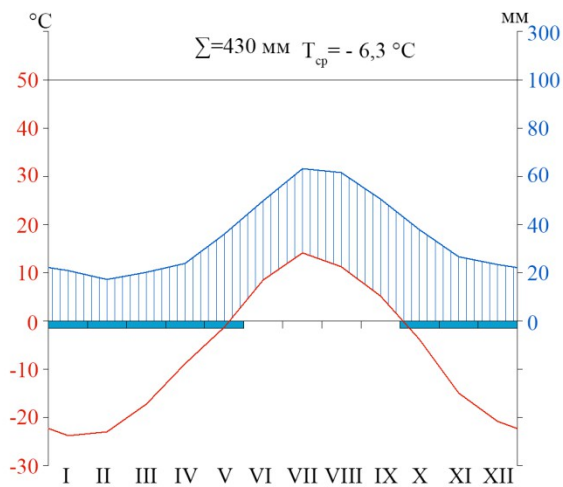


Рисунок 2. Климатограмма Вольтера-Лейха по данным метеостанции Салехард (66°32' с. ш., 66°32' в. д.; 35 м н.у.м. за период 1900-2020 гг.). Синяя и красная линии – средняя многолетняя сумма осадков и среднемесячная температура, соответственно

Figure 2. Walter & Lieth climadiagram by Salekhard weather station data (66°32' N, 66°32' E; 35m a.s.l.; 1900–2020). Blue and red line are the long-term average sum of precipitation and average monthly temperature, respectively

Источник: архивные записи данных с м/с Салехард
Source: archival data records from m/s Salekhard

Закладка пробных площадей для изучения времени появления особей проведена в 2014 году в долине реки Хадьгта-Яха в экотоне северной границы леса в южной части полуострова Ямал. Река Хадьгта-Яха протекает на территории Приуральского и Ямальского районов Ямало-Ненецкого автономного округа (рис. 1). Ее протяженность состав-

ляет 222 километра. Площадь водосборного бассейна 3650 км². Координаты истока: 67°40'55'' с.ш.; 70°13'19'' в.д. Высота над уровнем моря – 56 метров. Самое северное положение среди деревьев на этой реке занимает лиственница сибирская, южнее произрастают смешанные лиственнично-еловые древостои.

В рамках данного исследования было заложено 11 пробных площадей размером 25x25 м [16] и одна пробная площадь размером 4000 м², в пределах 4-х типов древостоя: тундра с одиночными деревьями (среднее расстояние между деревьями 20-50 м), северная граница лиственничных редколесий, северная граница смешанных редколесий (для *Larix sibirica* Ledeb. и *Picea obovata* Ledeb.) (расстояние между деревьями 7-20 м) и сомкнутый лес (расстояние < 7 м). Типы древостоя были определены, основываясь на методике, предложенной в работе С.Г. Шиятова [17].

В рамках данного исследования выборка была разделена на две категории: взрослые и молодые особи (подрост). Толкование термина «подрост» в разных источниках сильно различается, и имеет разные критерии по высоте либо по возрасту [18,19].

Выделение подроста как самостоятельного элемента древостоя проведено нами на основании анализа зависимости между возрастом особи и её высотой. К молодым особям (подросту) относили особи древесных растений высотой не более 2 м [20] и возрастом до 30 лет, то есть не достигшие возраста семеношения [21].

Для всех взрослых особей и единиц подроста были определены основные морфометрические параметры. Высота определялась с помощью мерной ленты или лазерного высотомера Bosch. Периметр у основания ствола и на высоте груди измерялся сантиметровой лентой.

Для установления точной даты появления дерева с каждой особи отбиралось по 1-2 керна древесины на высоте 0,1-0,15 м от корневой шейки с помощью приростного бурава Пресслера. Данный бурав позволяет высверлить из стволов цилиндры диаметром примерно 5 мм, не нанося вреда дереву. Поскольку деревья, произрастающие на севере, имеют очень твердую древесину, для облегчения

бурения использовался модифицированный аккумуляторный шуруповёрт DeWalt. Также отбирались спилы со всех погибших деревьев для датировки времени их появления и гибели. Сбор спилов позволял также облегчить выявление ложных и выпадающих колец, которые часто могут быть не представлены на единичном керне.

Определение времени жизни особей проводили по методике, предложенной в статье Хантемирова с соавторами [12]. В лаборатории все керны были зафиксированы на деревянных подложках при помощи клея ПВА, а затем зачищены опасной бритвой или канцелярским ножом, чтобы были четко видны границы годовичных слоев прироста. Все собранные спилы были зашлифованы при помощи шлифовальной машины Metabo абразивными лентами различной зернистости (от 120 до 1500). Контрастность рисунка годовичных колец на кернах

и спилах была повышена с помощью водно-меловой суспензии. Ширину годовичных колец измеряли на полуавтоматическом комплексе LINTAB 5 в программном пакете TSAP [22]. Все образцы были перекрестно датированы, качество датировки проверялось в программе COFESHA [23, 24]. Оценка связи между частотой появления деревьев и климатическими переменными проведена методом ранговой корреляции Спирмена.

Результаты

Изученные древостои сформированы двумя видами: лиственницей сибирской и елью сибирской. В тундре с одиночными деревьями и в самых северных редколесьях лиственница образует чистые древостои. Ель появляется южнее в пределах северной границы смешанных редколесий, где становится доминирующей породой. Её доля в составе древостоев достигает 76 % (табл. 1).

Характеристика типов древостоя

Таблица 1

Table 1

Characteristics of stand types

Характеристика Parameter	Типы древостоя Stand type			
	Тундра с одиночными деревьями Isolated trees in tundra	Северная граница редколесий Open forest	Северная граница смешанных редколесий Open mixed forest	Северная граница сомкнутых лесов Closed forest
Количество пробных площадей Number of plots	1	2	4	5
Исследуемая площадь, м ² Study area, m ²	4000	1250	2500	3125
Густота древостоя, особей/стволов на га ⁻¹ Density of forest, individuals/trunk per ha ⁻¹	53/73	632/1360	1004/1004	464/464
Соотношение пород <i>Larix/Picea</i> , % Tree species ratio <i>Larix/Picea</i> , %	100/0	100/0	24/76	95/5
Густота подроста, индивидуум на га ⁻¹ Density of undergrowth, individual per ha ⁻¹	86	1616	404	170
Процент погибших особей Percentage of dead individuals	3	16	9	30
Высота кустарникового яруса, м Height of the shrub layer, m	1,3	0,5	1,5	2,3

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

Ранее в исследованиях северных и верхних границ леса было показано, что для лиственницы характерна более высокая устойчивость к экстремальным климатическим факторам за счет чего она может занимать более северное по отношению к ели положение [25, 26].

В тундре с одиночными деревьями и лиственничных редколесьях представлено большое количество индивидуумов, имеющих многоствольную форму роста. Их доля составляет 33 и 57% от общего количества взрослых особей соответственно. Образование данной экоморфы связано с адаптацией древесных растений к экстремальным условиям среды, таким как низкие температуры, снежная и ледовая абразия, приводящим к деформации крон, отмиранию части побегов, многократному перевершиниванию и укоренению приземных ветвей деревьев [27, 28].

Вдоль исследуемой трансекты отмечается существенное изменение состава, густоты и возраста древостоев, в зависимости от их пространственного положения. Густота изученных древостоев значительно различается при переходе от одного типа к другому. Максимальная густота отмечается на северной границе редколесий и в среднем составляет 1360 стволов на гектар, там же наиболее активно идет современное лесовозобновление. На всех изученных площадках отмечается наличие всходов и подростов лиственницы и ели, что может свидетельствовать о благоприятности текущих климатических условий для появления и выживания семян.

В пределах тундры с одиночными деревьями количество молодых особей (86 шт./га) превышает количество стволов взрослых особей (73 шт./га), что может косвенно свидетельствовать о превращении в будущем данных сообществ в редколесья. На участках северной границы сомкнутых лесов подростов гораздо меньше, вероятно, он не имеет возможности закрепиться под пологом первого яруса из-за высокой конкуренции за ресурсы, в том числе за солнечный свет под сомкнутыми кронами древесного и кустарникового яруса [29]. Таким образом, в рассматриваемом экотоне с начала XX

века происходили, описанные ранее для других регионов Субарктики, процессы резкого увеличения густоты древостоев, занимающих промежуточную позицию между сомкнутыми лесами и тундрой с одиночными деревьями [9, 30, 31].

По мере перехода от редколесий к сомкнутому лесу, отмечается постепенное увеличение средних морфометрических параметров взрослых особей ели и лиственницы. В тундре с одиночными деревьями, а также в чистых и смешанных редколесьях средняя высота взрослых особей лиственницы варьирует от 4,4 до 5,9 м. Выявить какие-либо закономерности между широтным положением древостоев и их средней высотой не удалось, что, в частности, может быть объяснено большим количеством многоствольных деревьев в структуре данных древостоев. Наличие конкурентных взаимоотношений внутри многоствольных куртин нарушает постоянство соотношений между диаметром и высотой стволов, так как приводит к росту преимущественно в высоту [28]. Средняя высота взрослых особей, как ели, так и лиственницы в сомкнутых лесах значимо больше, по сравнению с более северными участками (табл. 2). Следует отметить, что схожие тенденции в морфологии деревьев были ранее показаны для древостоев в других арктических регионах [32, 33].

Средний возраст древостоев также значительно изменяется в пределах изучаемого профиля, увеличиваясь при продвижении с севера на юг. В самых северных древостоях (тундра с одиночными деревьями) возраст наиболее старых ныне живущих взрослых особей составляет 158 лет, но их количество составляет всего 3 % от общего количества. Активное появление и выживание новых особей началось в XX в. Скорость появления деревьев начиная с 30-х годов XX века практически не менялась, составляя в среднем 9 особей на гектар в декаду (рис. 3, А). В среднем за 100 лет густота в данном типе древостоя увеличилась в 31,5 раз.

Динамика процесса появления новых деревьев, наблюдаемая в лиственничных и смешанных редколесьях, схожа, за исключением более раннего появления деревьев в смешанных древостоях.

Морфометрические характеристики исследуемых типов древостоя

Table 2

Morphometric characteristics of the studied stand types

	Тип древостоя Stand type					
	Тундра с оди- ночными дере- вьями Isolated trees in tundra	Северная граница ред- колесий Open forest	Северная граница сме- шанных редколесий Open mixed forest		Северная граница со- мкнутых лесов Closed forest	
	Лиственница Larch	Лиственница Larch	Лиственница Larch	Ель Spruce	Лиственница Larch	Ель Spruce
Диаметр ствола у основания, см Stem diameter at the base, sm						
Стволы взрос- лых особей Adult trunks	10,5±1,2	5,8±0,3	10,3±0,9	5,6±0,3	12,5±0,6	9±1,8
Подрост Undergrowth	1,7±0,3	0,7±0,1	0,7±0,1	1,7±0,3	0,4±0,1	–
Высота, м Height, m						
Стволы взрос- лых особей Adult trunks	4,9±0,4	3,2±0,1	5,9±0,3	3,7±0,2	8,3±0,4	5,1±1,1
Подрост Undergrowth	0,40±0,06	0,38±0,03	0,43±0,03	1,1±0,17	0,37±0,03	–
Возраст, лет Age, years						
Стволы взрос- лых особей Adult trunks	68±5	50±1	85±7	63±3	92±3	56±9
Подрост Undergrowth	15±1	14±1	16±1	27±1	15±1	–

Примечание (Note): приведены средние значения и ошибки средних (mean values and errors of mean values are given)

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

В редколесьях взрывной рост частоты появления новых деревьев начался в 1930-е годы, и достиг максимума 60-е, 70-е годы XX века. Таким образом, период с середины XIX века можно считать временем начала активного формирования современных редколесий. Таким образом, к концу XX века средняя густота в редколесьях выросла в 9-31 раз. Также следует отметить замедление процесса лесовозобновления как в чистых лиственничных, так и в смешанных редколесьях в конце XX, начале XXI веков (рис. 3, Б, В).

Самые старые деревья (до 290 лет) произрастают в сомкнутом лесу, где также наблюдается максимальный средний возраст. Резкое увеличение густоты данных древостоев произошло в 40-е годы XIX века (рис. 3, Г). Начиная с этого периода данные территории представляли собой аналог современных редколесий. Густота древостоя за 100 лет увеличилась в 5,5 раз. При этом появление новых деревьев лиственницы проходило достаточно равномерно, без явно выраженных пиков, а скорость лесовозобновления в XX веке была в 1,5-4 раза ни-

же по сравнению с редколесьями. С одной стороны это могло быть вызвано процессами усиления конкуренции в древостое, а также изменениями в составе растительности и, в частности, распространение кустарников в арктической лесотундре, которые являются одними из наиболее важных и широ-

ко наблюдаемых реакций высокоширотных экосистем на быстрое потепление климата [34,35]. Значительное количество особей ели в данном типе древостоя появилось в середине XX века.

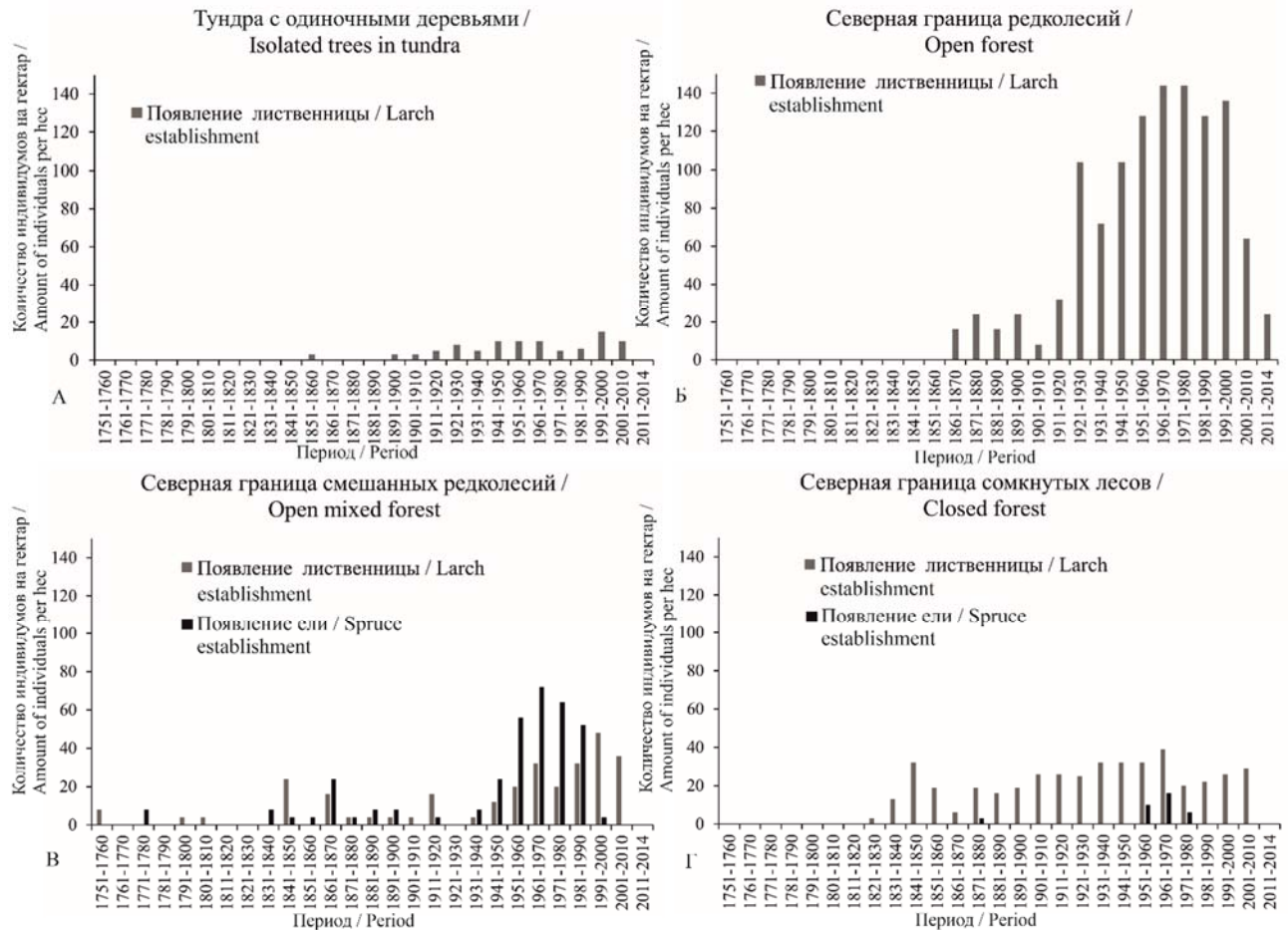


Рисунок 3. Количество появившихся стволов деревьев в расчете на гектар, в разные периоды времени

Figure 3. Amount of appeared trees trunks per hectare over different periods of time

Источник: собственные данные автора

Source: author's composition

Для оценки влияния климатических факторов на выживание молодых особей в пределах экотона был проведен корреляционный анализ частот появления деревьев, усредненных по десятилетиям с основными климатическими переменными за два периода – период вегетации (июнь-август) и период покоя (сентябрь-май). Следует отметить, что для района исследований имеется достаточно продолжительный непрерывный ряд метеонаблюдений, позволяющий оценить динамику основных климатических переменных на временном интервале бо-

лее ста лет. Анализ трендов изменения климата района выявил несколько закономерностей.

Так по данным м/с Салехард [15] наблюдается значительный рост среднемесячных температур воздуха июня-августа (рис. 4). Хорошо замечено увеличение средней температуры воздуха рассматриваемого теплого периода начиная с 20-х годов XX в. Каждое последующее десятилетие было значимо теплее предыдущего, а десятилетие с 2005 по 2015 гг. было на 1,8 °C теплее, первого десятилетия XX в.

Динамика количества летних осадков также указывает на значительный рост увлажненности территории. Средняя многолетняя сумма осадков периода июня-августа за сто лет увеличилась на 14 мм (рис. 4).

Переходя к оценке влияния климатических переменных на наблюдаемые изменения в густоте древостоев следует отметить, что выбор календарных периодов (вегетации/покоя) был проведен на основе сроков начала и окончания периода вегетации, то есть устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через +5 °С [36]. Анализ связи изменения густоты древостоев с температурой воздуха показал, что температура в период покоя

не оказывает статистически значимого влияния на выживание молодых особей во всех исследованных типах древостоя (табл. 3). В то же время, установлены тесные корреляционные связи между выживанием новых особей и количеством осадков в период вегетации, т.е. с июня по август. Данная связь характерна для тундры с одиночными деревьями, а также лиственных и смешанных редколесий. В сомкнутом лесу ни температура воздуха, ни количество осадков не оказывают влияние на выживание новых особей. Это может быть связано с большей ролью биотических взаимоотношений и световой конкуренцией между деревьями в данном типе древостоя.

Таблица 3

Корреляция между частотой появления деревьев и сезонными климатическими переменными

Table 3

Correlation between tree frequency and seasonal climate variables

	Тип древостоя Stand type			
	Тундра с одиночными деревьями Isolated trees in tundra	Северная граница редколесий Open forest	Северная граница смешанных редколесий Open mixed forest	Северная граница сомкнутых лесов Closed forest
Температура воздуха Air temperature				
Период вегетации (Июнь-Август) Growth period (June-August)	-0,01	-0,09	0,01	-0,41
Период покоя (Сентябрь-Май) Dormant period (September-May)	-0,06	-0,07	-0,21	-0,52
Осадки Precipitation				
Период вегетации (Июнь-Август) Growth period (June-August)	0,69*	0,74*	0,69*	0,43
Период покоя (Сентябрь-Май) Dormant period (September-May)	0,41	0,53	0,47	0,12

Примечание (Note). *- обозначены значимые коэффициенты корреляции при N=12 p<0,05 (* - significant correlation coefficients, N=12 p<0.05)

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

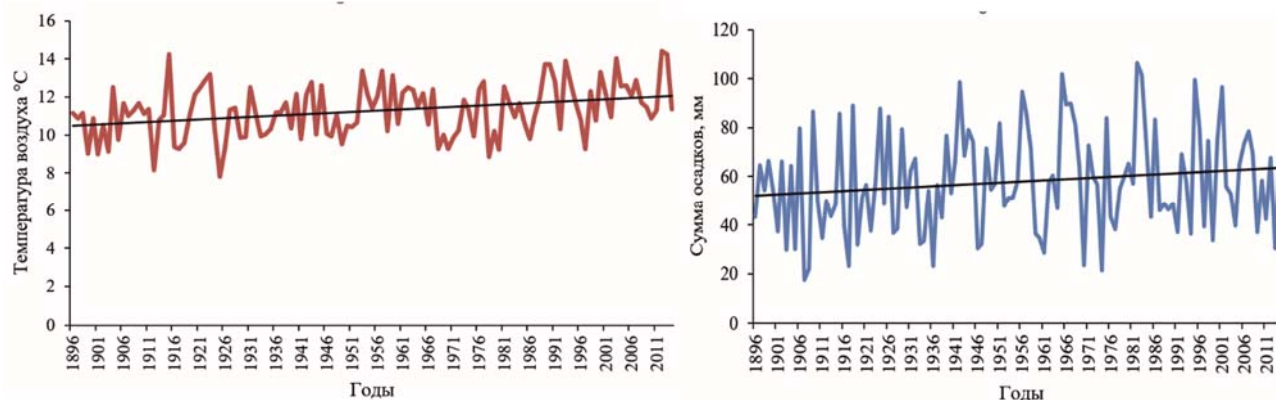


Рисунок 4. Динамика температуры воздуха (слева) и суммы осадков (справа) июня-августа по данным м/с Салехард

Figure 4. Climate dynamics according to the Salekhard weather station (A - dynamics of air temperature June-August, B - dynamics of precipitation June-August).

Источник: архивные записи данных с м/с Салехард
Source: archival data records from m/s Salekhard

Обсуждение

Наше исследование показало, что на протяжении XX века экотон северной границы леса на Ямале претерпел значительные изменения. Густота древостоев в экотоне северной границы леса на в долине реки Хадыта-Яха увеличилась в среднем в 11,5 раз, причем более 90% деревьев появилось за последние 115 лет. Участки тундры, которые в начале XX века были безлесными, теперь покрыты редколесьями. Большое количество подроста в редколесьях свидетельствует о том, что в настоящее время процесс активного лесовозобновления продолжается. В частности, благодаря установленным связям с климатическими переменными, мы предполагаем, что увеличение сомкнутости древостоев было вызвано, в основном, изменением режима увлажнения вегетационного периода. С.Г. Шиятов в работе 1967 года указывает, что для успешного лесовозобновления в условиях лесотундры необходимы следующие 3 условия: достаточное количество жизнеспособных семян, благоприятные условия для появления всходов и благоприятные условия для роста и развития подроста [37]. Особенно важны климатические условия в первые годы после попадания семян на пригодный для прорастания субстрат, а главным лимитирующим фактором является влажность субстрата. Увеличение в 1,3 раза количества летних осадков и на 1,8°C темпера-

туры воздуха также способствовало лучшей выживаемости семян. В условиях лесотундры для выживания подроста необходим благоприятный для роста период времени, в течение нескольких десятилетий, так как за меньший промежуток времени подрост не успевает выйти из зоны на поверхности снегового покрова и погибает. Полученные данные полностью согласуются с данными по естественной динамике древостоев для территории Полярного Урала [9,38,39] и северной границы леса в Евразии [40s].

Различия с данными, представленными в работе Хантемирова и др. 2008 [12], где показано, что возникновение поколений лиственницы в долинах северных рек в значительной степени определяется температурой воздуха июля, можно объяснить методическими различиями в проведении исследования. В частности, в работе Хантемирова с соавторами в анализ включались только особи, достигшие на момент исследования диаметра не менее 4 см на высоте груди, что соответствовало высоте особей не менее 3,5 м. В проведенный нами анализ были включены не только взрослые особи, но и молодые (подрост). Кроме того, в анализе рассматриваемой работы деревья из всех типов древостоя были объединены в одну выборку, в то время как мы рассматриваем каждый выделенный тип отдельно. Еще одним отличием является значительное разли-

чие в породном составе изучаемых древостоев – в нашей работе в смешанных редколесьях и сомкнутом лесе присутствуют особи ели сибирской.

Заключение

На фоне значительного повышения средне-летних температур, а также роста суммы осадков вегетационного периода в экотоне северной границы леса в южной части полуострова Ямал произошли значительные изменения в составе и структуре древостоев. Результаты исследования свидетельствуют о том, что на границе леса в пределах реч-

ной долины реки Хадыга-Яха идет активное возобновление и расселение древесной растительности на участках, занятых до середины XIX века тундровыми сообществами.

Фактором, способствующим появлению и выживанию новых особей, является количество осадков с июня по август. При сохранении благоприятной климатической ситуации это может привести к значительному увеличению лесопокрытой площади на полуострове Ямал.

Список литературы

1. IPCC. Summary for Policymakers // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / ed. Masson-Delmotte V. et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. P. 3–32. Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
2. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. [et al.]. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Commun. Earth and Environment*. – 2022. – Vol. 3. – №. 1. – P. 1-10. DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3
3. Zhang M., Liu S., Jones J. [et al.]. Managing the forest-water nexus for climate change adaptation // *Forest Ecology and Management*. – 2022. – Vol. 525. – P. 120545. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120545
4. Muthee K., Duguma L., Wainaina P. [et al.]. A Review of Global Policy Mechanisms Designed for Tropical Forests Conservation and Climate Risks Management // *Frontiers in Forests and Global Change*. – 2022. – Vol. 4. – P. 748170. DOI: 10.3389/ffgc.2021.748170
5. Roshani, Sajjad H., Kumar P. [et al.]. Forest Vulnerability to Climate Change: A Review for Future Research Framework // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – №. 6. – P. 917. DOI: 10.3390/f13060917
6. *Boreal Forests in the Face of Climate Change* / ed. Girona M.M. et al. Cham: Springer International Publishing. – 2023. – Vol. 74. – 837 p. DOI:10.1007/978-3-031-15988-6
7. Becker-Scarpitta A., Parisy B., Roslin T. Recent History of Vegetation Changes in the Arctic // *Historical Ecology: Learning from the Past to Understand the Present and Forecast the Future of Ecosystems*. – 2022. – P. 221-232. DOI: 10.1002/9781394169764.ch17
8. Winkler D. E., Lubetkin K. C., Carrell A. A., Jabis M. D., Yang Y., Kueppers L. M. Responses of alpine plant communities to climate warming // *Ecosystem Consequences of Soil Warming: Microbes, Vegetation, Fauna and Soil Biogeochemistry*. – 2019. – Iss. 4. – P. 297–346. DOI: 10.1016/B978-0-12-813493-1.00013-2
9. Devi, N. M., Kukarskih, V. V., Galimova, A. A., Mazepa, V. S., Grigoriev, A. A. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains // *Forest Ecosystems*. 2020. – 2020. – Vol. 7. – Iss. 1. – P. 1-16. DOI: 10.1186/s40663-020-0216-9
10. Nizametdinov, N. F., Shalaumova, Y. V., Mazepa, V. S., Moiseev, P. A. Assessment of Past Decadal Dynamics of Tree Stands in Forest–Tundra Transition Zone on the Polar Ural Mountains Calibrated Using Historical and Modern Field Measurements // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – Iss. 12. – P. 2107. DOI: 10.3390/f13122107
11. Hagedorn F., Dawes M. A., Bubnov M. O. [et al.]. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit // *Journal of Biogeography*. – 2020. – Vol. 47. – Iss. 8. – P. 1827-1842. DOI: 10.1111/jbi.13867

12. Hantemirov R. M., Surkov A. Y., Gorlanova L. A. Climate changes and overstory recruitment of larch at the northern timberline in the Yamal Peninsula // *Russian Journal of Ecology*. – 2008. – Vol. 39. – Iss. 5. – P. 305-309. DOI: 10.1134/S1067413608050019
13. Природа Ямала // В. Н. Большаков, В. С. Балахонов, В. Д. Громик [и др.]. – Екатеринбург: Уральская издательская фирма "Наука", 1995. – 435 с. – ISBN 5-02-007435-7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20153595>
14. Атлас Арктики // под ред. Трешников А.Ф. Москва: Фабрика № 2 ГУГК, 1985. 204 р. Режим доступа: <https://www.nehudlit.ru/books/atlas-arktiki.html>
15. Летопись погоды в г. Салехард URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 30.10.2023).
16. Leiter M., Hasenauer H. Continuous Cover Forestry: Which sampling method should be used to ensure sustainable management? // *Trees, Forests and People*. – 2023. – Vol. 13. P. 100419. DOI: 10.1016/j.tfp.2023.100419.
17. Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале // *Лесоведение*. – 2007. – № 6. – С. 11-22. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9568137>
18. Каплан Б. М. Изучение лесной растительности. Методическое пособие // М.: Лесная страна, 2009. – 136 с. Режим доступа: https://mducekt.mskobr.ru/files/kaplan_metodichka.pdf
19. Козин Е. К. Что называть подростом // *Лесоведение*. – 2011. – № 1. – С. 69-72. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16310990>
20. Holtmeier F. K. (ed.). *Mountain timberlines*. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. – Т. 36. DOI: 10.1007/978-1-4020-9705-8
21. Дылис Н. В. Лиственница. — М.: Лесная пром-сть, 1981. — 96 с. Режим доступа: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/dylislistv/index.htm>
22. Rinn F. Tsap V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg, Germany. – 1996. Режим доступа: <https://rinntech.info/products/tsap-win/>
23. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bull.* – 1983. – Vol. 43. – P. 69-78. Режим доступа: <https://hdl.handle.net/10150/261223>
24. Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECOA // *Tree-Ring Res.* – 2001. – Vol. 57. – Iss. 2. – P. 205-221. Режим доступа: <https://repository.arizona.edu/handle/10150/251654>
25. Benowicz A., Krakowski J., Rweyongeza D. Growth and survival of Siberian larch in Alberta at the species, population, and family levels / *Canadian Journal of Forest Research*. – 2019. – Vol. 49. – Iss. 9. – P. 1042-1051. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0014
26. Ols C., Herve J., Bontemps J. Recent growth trends of conifers across Western Europe are controlled by thermal and water constraints and favored by forest heterogeneity // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 742. – P. 140453. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140453.
27. Мазепа В. С., Дэви Н. М. Образование многоствольных жизненных форм деревьев лиственницы сибирской в экотоне верхней границы леса на Полярном Урале как индикатор изменения климата // *Экология*. – 2007. – № 6. – С. 471-475. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9568029>
28. Devi N., Hagedorn F., Moiseev P., Bugmann H., Shiyatov S., Mazepa V., Rigling A. Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century // *Global Change Biology*. – 2008. – Vol. 14. – P.1581-1591 DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01583.x
29. Zaitsev G., Davydychev A., Kulagin A. [et al.]. Suppressed Undergrowth of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in Early Ontogeny: One-Way Ticket or Survival Strategy? // *Forests*. – 2021. – Vol. 12 – Iss. 7. – P. 851. DOI: 10.3390/f12070851
30. Hagedorn F. Shiyatov S., Mazepa V. [et al.]. Treeline advances along the Urals mountain range - driven by improved winter conditions? // *Global change biology*. – 2014. – Vol. 20. – №. 11. – P. 3530-3543. DOI: 10.1111/gcb.12613

31. Shiyatov S.G., Mazepa V.S. Contemporary expansion of Siberian larch into the mountain tundra of the Polar Urals // *Russian Journal of Ecology*. – 2015. – Vol. 46. – P. 495-502. DOI: 10.1134/S1067413615060168
32. Wiczorek, M., Kruse, S., Epp, L. S. [et al.]. Dissimilar responses of larch stands in northern Siberia to increasing temperatures—a field and simulation based study // *Ecology*. – 2017. – Vol. 98. – Iss. 9. – P. 2343-2355. DOI: 10.1002/ecy.1887
33. Holtmeier F.-K., Broll G. Treeline advance - driving processes and adverse factors // *Landscape online*. – 2007. – P. 1-32. DOI: 10.3097/LO.200701
34. Mekonnen Z., Riley W., Berner L. [et al.]. Arctic tundra shrubification: a review of mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance // *Environmental Research Letters*. – 2021. – Vol. 16. – №. 5. – P. 053001. DOI: 10.1088/1748-9326/abf28b
35. Berner L.T. Beck P., Bunn A., Goetz S. Plant response to climate change along the forest-tundra ecotone in northeastern Siberia // *Global Change Biology*. – 2013. – Vol. 19. – №. 11. – P. 3449-3462. DOI: 10.1111/gcb.12304
36. Горчаковский П. Л., Шиятов С. Г. Физиономическая и экологическая дифференциация верхней границы леса на Северном Урале // *БОТАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УРАЛЕ*. – 1970. – С. 14-33. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29133445>
37. Шиятов С.Г. Колебания климата и возрастная структура древостоев лиственничных редколесий в горах Полярного Урала // *Растительность лесотундры и пути ее освоения / АН СССР, Ботанич. ин-т им. В.Л. Комарова*. – Л.: Наука, Ленинград. 1967. – С. 271-278. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29024132>
38. Mazepa V. S. Stand density in the last millennium at the upper tree-line ecotone in the Polar Ural Mountains // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2005. – Vol. 35. – Iss. 9. – P. 2082-2091. DOI: 10.1139/x05-111
39. Devi, N. M., Kukarskih, V. V., Galimova, A. A., Bubnov, M. O., Zykov, S. V. Modern dynamics of high-mountain forests in the Northern Urals: Major trends // *Journal of Siberian Federal University. Biology*. – 2018. – Vol. 11, – Iss. 3. – P. 248-259. DOI: 10.17516/1997-1389-0069
40. Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской субарктике. – Новосибирский филиал Федерального государственного унитарного предприятия "Академический научно-издательский и книгораспространительский центр" Наука", – 1996. – 246 с. ISBN: 5-02-031185-5 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20147724>

References

1. IPCC. Summary for Policymakers // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. Masson-Delmotte V. et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. P. 3–32. Режим доступа: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>*
2. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. [et al.]. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Commun. Earth and Environment*. – 2022. – Vol. 3. – №. 1. – P. 1-10. DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3
3. Zhang M., Liu S., Jones J. [et al.]. Managing the forest-water nexus for climate change adaptation // *Forest Ecology and Management*. – 2022. – Vol. 525. – P. 120545. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120545
4. Muthee K. Duguma L., Wainaina P. [et al.]. A Review of Global Policy Mechanisms Designed for Tropical Forests Conservation and Climate Risks Management // *Frontiers in Forests and Global Change*. – 2022. – Vol. 4. – P. 748170. DOI: 10.3389/ffgc.2021.748170
5. Roshani, Sajjad H., Kumar P. [et al.]. Forest Vulnerability to Climate Change: A Review for Future Research Framework // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – №. 6. – P. 917. DOI: 10.3390/f13060917
6. *Boreal Forests in the Face of Climate Change / ed. Girona M.M. et al. Cham: Springer International Publishing. – 2023. – Vol. 74. – 837 p. DOI:10.1007/978-3-031-15988-6*

7. Becker-Scarpitta A., Parisy B., Roslin T. Recent History of Vegetation Changes in the Arctic // Historical Ecology: Learning from the Past to Understand the Present and Forecast the Future of Ecosystems. – 2022. – P. 221-232. DOI: 10.1002/9781394169764.ch17
8. Winkler D. E., Lubetkin K. C., Carrell A. A., Jabis M. D., Yang Y., Kueppers L. M. Responses of alpine plant communities to climate warming // Ecosystem Consequences of Soil Warming: Microbes, Vegetation, Fauna and Soil Biogeochemistry. – 2019. – Iss. 4. – P. 297–346. DOI: 10.1016/B978-0-12-813493-1.00013-2
9. Devi, N. M., Kukarskih, V. V., Galimova, A. A., Mazepa, V. S., Grigoriev, A. A. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains // Forest Ecosystems. 2020. – 2020. – Vol. 7. – Iss. 1. – P. 1-16. DOI: 10.1186/s40663-020-0216-9
10. Nizametdinov, N. F., Shalaumova, Y. V., Mazepa, V. S., Moiseev, P. A. Assessment of Past Decadal Dynamics of Tree Stands in Forest–Tundra Transition Zone on the Polar Ural Mountains Calibrated Using Historical and Modern Field Measurements // Forests. – 2022. – Vol. 13. – Iss. 12. – P. 2107. DOI: 10.3390/f13122107
11. Hagedorn F., Dawes M. A., Bubnov M. O. [et al.]. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit // Journal of Biogeography. – 2020. – Vol. 47. – Iss. 8. – P. 1827-1842. DOI: 10.1111/jbi.13867
12. Hantemirov R. M., Surkov A. Y., Gorlanova L. A. Climate changes and overstory recruitment of larch at the northern timberline in the Yamal Peninsula // Russian Journal of Ecology. – 2008. – Vol. 39. – Iss. 5. – P. 305-309. DOI: 10.1134/S1067413608050019
13. V. N. Bolshakov, V. S. Balakhonov, V. D. Gromik [et al.]. *Priroda Yamala* [Nature of Yamal] Ekaterinburg, Ural publishing company "Nauka", 1995. – 435 p. – ISBN 5-02-007435-7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20153595> (In Russian)
14. Treshnikov A.F. Atlas Arktiki [Atlas of the arctic] / National Commission of Hydrometeorology and Environmental Protection, Major Department of Geodesy and Cartography. USSR, Moscow. – 1985. 204 p. URL: <https://www.nehudlit.ru/books/atlas-arktiki.html> (In Russian)
15. *Letopis' pogody v g. Salekhard* [Weather record in Salekhard] URL: <http://meteo.ru/> (access date: 10.30.2023). (In Russian)
16. Leiter M., Hasenauer H. Continuous Cover Forestry: Which sampling method should be used to ensure sustainable management? // Trees, Forests and People. – 2023. – Vol. 13. P. 100419. DOI: 10.1016/j.tfp.2023.100419.
17. Shiyatov S. G., Mazepa V. S. *Klimatogennaya dinamika lesotundrovoj rastitel'nosti na Polyarnom Urale* [Climatogenic dynamics of forest-tundra vegetation in the Polar Urals] // Lesovedenie [Forestry]. – 2007. – № 6. – P. 11-22. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9568137> (In Russian)
18. Kaplan B. M. *Izucheniye lesnoy rastitel'nosti. Metodicheskoye posobiye* [Study of forest vegetation. Methodological manual] / *Lesnaya strana* [Forest Country], Moscow. – 2009. 136 p. URL: https://mducekt.mskobr.ru/files/kaplan_metodichka.pdf (In Russian)
19. Kozin E.K. *Chto nazyvat' podrostom?* [What to call a undergrowth?] // *Lesovedenie* [Forestry]. – 2011. – № 1. – P. 69-72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16310990> (In Russian)
20. Holtmeier F. K. (ed.). Mountain timberlines. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. – T. 36. DOI: 10.1007/978-1-4020-9705-8
21. Dylis N.V. *Listvennitsa* [Larch] // *Lesnaya prom-st'* [Forest industry]. Moscow. – 1981. – 96 p. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/dylislistv/index.htm> (In Russian)
22. Rinn F. Tsap V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg, Germany. – 1996. URL: <https://rinntech.info/products/tsap-win/>
23. Holmes R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bull.* – 1983. – Vol. 43. – P. 69-78. URL: <https://hdl.handle.net/10150/261223>

24. Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA // *Tree-Ring Res.* – 2001. – Vol. 57. – Iss. 2. – P. 205-221. URL: <https://repository.arizona.edu/handle/10150/251654>
25. Benowicz A., Krakowski J., Rweyongeza D. Growth and survival of Siberian larch in Alberta at the species, population, and family levels // *Canadian Journal of Forest Research.* – 2019. – Vol. 49. – Iss. 9. – P. 1042-1051. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0014
26. Ols C., Herve J., Bontemps J. Recent growth trends of conifers across Western Europe are controlled by thermal and water constraints and favored by forest heterogeneity // *Science of The Total Environment.* – 2020. – Vol. 742. – P. 140453. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140453.
27. Mazepa V. S., Davy N. M. Obrazovanie mnogostvol'nyh zhiznennyh form derev'ev listvennicy sibirskoj v ekotone verhnjej granicy lesa na Polyarnom Urale kak indikator izmeneniya klimata [Formation of multi-stemmed life forms of Siberian larch trees in the ecotone of the upper forest limit in the Polar Urals as an indicator of climate change] // *Ekologiya [Ecology].* – 2007. – №. 6. – С. 471-475. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9568029> (In Russian)
28. Devi N., Hagedorn F., Moiseev P., Bugmann H., Shiyatov S., Mazepa V., Rigling A. Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century // *Global Change Biology.* – 2008. – Vol. 14. – P.1581-1591 DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01583.x
29. Zaitsev G., Davydychev A., Kulagin A. [et al.]. Suppressed Undergrowth of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in Early Ontogeny: One-Way Ticket or Survival Strategy? // *Forests.* – 2021. – Vol. 12 – Iss. 7. – P. 851. DOI: 10.3390/f12070851
30. Hagedorn F. Shiyatov S., Mazepa V. [et al.]. Treeline advances along the Urals mountain range - driven by improved winter conditions? // *Global change biology.* – 2014. – Vol. 20. – №. 11. – P. 3530-3543. DOI: 10.1111/gcb.12613
31. Shiyatov S.G., Mazepa V.S. Contemporary expansion of Siberian larch into the mountain tundra of the Polar Urals // *Russian Journal of Ecology.* – 2015. – Vol. 46. – P. 495-502. DOI: 10.1134/S1067413615060168
32. Wiczorek, M., Kruse, S., Epp, L. S. [et al.]. Dissimilar responses of larch stands in northern Siberia to increasing temperatures-a field and simulation-based study // *Ecology.* – 2017. – Vol. 98. – Iss. 9. – P. 2343-2355. DOI: 10.1002/ecy.1887
33. Holtmeier F.-K., Broll G. Treeline advance - driving processes and adverse factors // *Landscape online.* – 2007. – P. 1-32. DOI: 10.3097/LO.200701
34. Mekonnen Z., Riley W., Berner L. [et al.]. Arctic tundra shrubification: a review of mechanisms and impacts on ecosystem carbon balance // *Environmental Research Letters.* – 2021. – Vol. 16. – №. 5. – P. 053001. DOI: 10.1088/1748-9326/abf28b
35. Berner L.T. Beck P., Bunn A., Goetz S. Plant response to climate change along the forest-tundra ecotone in northeastern Siberia // *Global Change Biology.* – 2013. – Vol. 19. – №. 11. – P. 3449-3462. DOI: 10.1111/gcb.12304
36. Gorchakovskiy P. L., Shiyatov S. G. *Fizionomicheskaya i ekologicheskaya differentsiatsiya verkhney granitsy le-sa na Severnom Urale* [Physiognomic and ecological differentiation of the upper forest boundary in the Northern Urals] // *BOTANICHESKIYE ISSLEDOVANIYA NA URAL* [BOTANICAL RESEARCH IN THE URAL]. – 1970. – P. 14-33. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29133445> (In Russian)
37. Shiyatov S.G. *Kolebaniya klimata i vozrastnaya struktura drevostoyev listvennichnykh redkolesiy v gorakh Po-lyarnogo Urala* [Climate fluctuations and age structure of stands of larch open forests in the mountains of the Polar Urals] // *Rastitel'nost' lesotundry i puti yeye osvoyeniya* [Forest-tundra vegetation and ways of its development] / *AN SSSR, Botanich. in-t im. V.L. Komarova* [USSR Academy of Sciences, Botanich. Institute named after V.L. Komarov]. – L.: Nauka [Science], Leningrad. 1967. – P. 271-278. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29024132> (In Russian)
38. Mazepa V. S. Stand density in the last millennium at the upper tree-line ecotone in the Polar Ural Mountains // *Canadian Journal of Forest Research.* – 2005. – Vol. 35. – Iss. 9. – P. 2082-2091. DOI: 10.1139/x05-111

39. Devi, N. M., Kukarskih, V. V., Galimova, A. A., Bubnov, M. O., Zykov, S. V. Modern dynamics of high-mountain forests in the Northern Urals: Major trends //Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2018. – Vol. 11, – Iss. 3. – P. 248-259. DOI: 10.17516/1997-1389-0069

40. Vaganov E. A., Shiyatov S. G., Mazepa V. S. *Dendroklimaticheskie issledovaniya v Uralo-Sibirskoy subarktike* [Dendroclimatic research in the Ural-Siberian subarctic]. –Novosibirsk branch of the Federal State Unitary Enterprise "Academic Scientific Publishing and Book Distribution Center "Science", – 1996. – 246 с. ISBN: 5-02-031185-5 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20147724> (In Russian).

Сведения об авторах

✉ *Бессонова Варвара Александровна* – лаборант лаборатории дендрохронологии, ФГБУН «Институт экологии растений и животных УрО РАН», ул. 8-Марта, 202, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, <https://orcid.org/0000-0002-9433-169X>, bessonova-varechka@mail.ru.

Кукарских Владимир Витальевич – кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории дендрохронологии, ФГБУН «Институт экологии растений и животных УрО РАН», ул. 8-Марта, 202, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, <https://orcid.org/0000-0002-6552-1726>, voloduke@mail.ru.

Дэви Надежда Михайловна – кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории дендрохронологии, ФГБУН «Институт экологии растений и животных УрО РАН», ул. 8-Марта, 202, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, <https://orcid.org/0000-0002-3756-4761>, nadya@ipae.uran.ru.

Сурков Иван Александрович – лаборант лаборатории дендрохронологии, ФГБУН «Институт экологии растений и животных УрО РАН», ул. 8-Марта, 202, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, <https://orcid.org/0009-0008-0326-7903>, surkov_va@list.ru.

Сурков Александр Юрьевич – инженер лаборатории дендрохронологии, ФГБУН «Институт экологии растений и животных УрО РАН», ул. 8-Марта, 202, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, <https://orcid.org/0009-0009-2429-6815>, surkov_au@mail.ru.

Горланова Людмила Аркадьевна – кандидат биол. наук, лаборант лаборатории дендрохронологии, ФГБУН «Институт экологии растений и животных УрО РАН», ул. 8-Марта, 202, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, <https://orcid.org/0000-0002-1400-821X>, gorlanova@ipae.uran.ru.

Хантемиров Рашид Мугатович – доктор биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дендрохронологии, ФГБУН «Институт экологии растений и животных УрО РАН», ул. 8-Марта, 202, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, <https://orcid.org/0000-0003-3033-8312>, rashit@ipae.uran.ru.

Information about the authors

✉ *Varvara A. Bessonova* – laboratory assistant, Laboratory of Dendrochronology, FSBIU "Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of RAS", 8-Marta St., 202, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, <https://orcid.org/0000-0002-9433-169X>, bessonova-varechka@mail.ru.

Vladimir V. Kukarskikh – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Dendrochronology, Institute of Ecology of Plants and Animals, Institute of Ecology of Plants and Animals, Ural Branch of RAS, 8-Marta St., 202, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, <https://orcid.org/0000-0002-6552-1726>, voloduke@mail.ru.

Nadezhda M. Devi – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Dendrochronology, Institute of Plant and Animal Ecology, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 8-Marta St., 202, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, <https://orcid.org/0000-0002-3756-4761>, nadya@ipae.uran.ru.

Ivan A. Surkov – laboratory assistant, Laboratory of Dendrochronology, Institute of Ecology of Plants and Animals, Institute of Ecology of Plants and Animals, Ural Branch of RAS, 8-Marta St., 202, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, <https://orcid.org/0009-0008-0326-7903>, surkov_va@list.ru.

Alexander Yu. Surkov – Engineer, Laboratory of Dendrochronology, Institute of Plant and Animal Ecology, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 8-Marta St., 202, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, <https://orcid.org/0009-0009-2429-6815>, surkov_au@mail.ru.

Ludmila A. Gorlanova – Cand. Sci. (Biol.), Laboratory Assistant, Laboratory of Dendrochronology, FSBIU "Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of RAS", 8-Marta St., 202, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, <https://orcid.org/0000-0002-1400-821X>, gorlanova@ipae.uran.ru.

Rashit M. Hantemirov – Dr. Sci (Biol.), Leading Researcher, Laboratory of Dendrochronology, FGBUN "Institute of Ecology of Plants and Animals, Ural Branch of RAS", 8-Marta St., 202, Ekaterinburg, Russian Federation, 620144, <https://orcid.org/0000-0003-3033-8312>, rashit@ipae.uran.ru

✉ Для контактов/Corresponding author