

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/22>

УДК 630.182.2 (571.621)



## Изменение климатической чувствительности основных хвойных видов Среднего Сихотэ-Алиня

Марина Е. Рублева<sup>1</sup>✉, marishka\_6500@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6609-4180>

Анна С. Возмищева<sup>1</sup>, voz mishcheva@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1597-6685>

Светлана Н. Бондарчук<sup>2</sup>, Bonsal@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-3641-5203>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБУ «Сихотэ-Алинский государственный природный биосферный заповедник имени К.Г. Абрамова», ул. Партизанская, 44, п. Терней, 92150, Российская Федерация

Климат Юга Дальнего Востока России подвержен изменениям, что доказывают метеорологические данные. Деревья являются надежным косвенным индикатором глобального изменения климата, что подтверждено в ряде опубликованных работ по всему миру. Многопородные, многоярусные, сложные по структуре леса Среднего Сихотэ-Алиня отличаются своими сложными динамическими процессами и отсутствием прямого антропогенного влияния. В работе рассматривается реакция деревьев на климатические факторы, с которыми есть значимая достоверная связь (осадки, температура). Керны были отобраны стандартными дендрохронологическими методиками. Для дендроклиматического анализа использован пакет “treeclim” программного обеспечения R. Получены графики по динамике климатической чувствительности основных хвойных видов Среднего Сихотэ-Алиня (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc., *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim., *Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carriere, *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) за период 78 лет. Проверена устойчивость дендроклиматических связей во времени и отмечены периоды ее изменения. Наиболее климатически чувствительными видами среди изученных оказались лиственница Гмелина и ель аянская. Они наиболее уязвимы к засухам и их ареал произрастания может сместиться на север при дальнейшем повышении среднемесячной температуры воздуха вегетационного сезона.

**Ключевые слова:** климат, дендрохронология, Дальний Восток, *Pinus koraiensis*, *Abies nephrolepis*, *Picea jezoensis*, *Larix gmelinii*

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00511, <https://rscf.ru/project/23-24-00511/>.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Рублева М. Е. Изменение климатической чувствительности основных хвойных видов Среднего Сихотэ-Алиня / М. Е. Рублева, А. С. Возмищева, С. Н. Бондарчук // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 156–173. – Библиогр.: с. 167–173 (51 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/22>.

Поступила 13.11.2023 Пересмотрена 06.12.2023 Принята 06.12.2023 Опубликована онлайн 16.01.2024

## Article

### Climate sensitivity alteration of the Middle Sikhote-Alin main conifer species

Marina E. Rubleva<sup>1</sup>✉, marishka\_6500@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6609-4180>

Anna S. Vozmishcheva<sup>1</sup>, vozmishcheva@inbox.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1597-6685>

Svetlana N. Bondarchuk<sup>2</sup>, Bonsal@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-3641-5203>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Svobodny pr., 79, Krasnoyarsk city, 660041, Russian Federation

<sup>2</sup>Sikhote-Alin State Natural Biosphere Reserve named after K.G. Abramova, st. Partizanskaya, 44, Terney settlement, 92150, Russian Federation

#### Abstract

Climate of the South of the Russian Far East is exposed to changes that are proved by meteorological data. Trees are a reliable indirect indicator of Global climate change, which has been confirmed in a number of published works around the world. The multi-species, multi-level, structurally complex forests of the Middle Sikhote-Alin are distinguished by their complex dynamic processes and the absence of direct anthropogenic influence. The trees' response to climatic factors with which there is a significant reliable relationship (precipitation, temperature) is observed in this work. Cores were selected using standard dendrochronological approaches. The "treeclim" package of R software was used for dendroclimatic analysis. Graphs were obtained for the dynamics of climatic sensitivity of the main conifer species of the Middle Sikhote-Alin (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc., *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim., *Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carriere, *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) for a period of 78 years. The stability of dendroclimatic relationships in time was examined and the periods of its alteration were noted. The most climate-sensitive species among those studied were Gmelin larch and Ayan spruce. They are most vulnerable to droughts and their habitats may shift northward with further increases in growing season mean monthly air temperatures.

**Keywords:** *climate, dendrochronology, Far East, Pinus koraiensis, Abies nephrolepis, Picea jezoensis, Larix gmelinii*

**Funding:** this study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project number 23-24-00511), <https://rscf.ru/project/23-24-00511/>.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Rubleva M. E., Vozmishcheva A. S., Bondarchuk S. N. (2023). Climate sensitivity alteration of the Middle Sikhote-Alin main conifer species. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No 4 (52), part 2, pp. 156-173 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/22>.

*Received* 13.11.2023. *Revised* 06.12.2023. *Accepted* 06.12.2023. *Published online* 16.01.2024

#### Введение

Глобальные изменения климата происходят повсеместно и подтверждаются большим количеством работ [5, 13, 27, 33]. Широко известно, что глобальные процессы оказывают влияние на изменение локальных микроклиматических параметров, в частности на Дальнем Востоке. Если добавить к этому пожары, вспышки массового

размножения патогенов, интенсивное лесопользование, то это не может не отразиться на динамике лесов. Понимание климатического отклика деревьев является ключевым вопросом с точки зрения климатической повестки дня основных международных организаций и глобального изменения климата [16, 26, 49]. Несмотря на то, что лес создает свой особый микроклимат, который оказывает влияние на рост,

возобновление и развитие фитоценоза, глобальные изменения не могут оставаться в стороне. Повсеместное изменение климата [18], интенсификация действия катастрофических явлений, также напрямую влияют на климатогенную динамику лесов. Климатически-обусловленная динамика лесов может быть вызвана изменением таких экзогенных факторов как температура воздуха, количество осадков, скорость ветра и другие. Существует мнение, что повсеместное повышение температур воздуха приведет к засухам и многие леса планеты окажутся под угрозой исчезновения [2]. Также стоит учитывать тот факт, что вызванные климатом изменения в конкурентоспособности деревьев из-за изменений в потенциальном росте и существенной интенсификации пожарного режима, особенно среди доминирующих видов, могут в совокупности приводить к серьезным изменениям в ландшафтах лесов [5].

Смешанные хвойно-широколиственные леса являются наиболее ценным типом лесных экосистем юга Дальнего Востока [50]. Они имеют сложную структуру и определяются богатым видовым разнообразием. Данные лесные сообщества характеризуются многоярусным строением разновозрастного многовидового древостоя, что также определяет их как наиболее ценные и продуктивные леса региона. Теневыносливым доминантом полога является кедр корейский (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.), который может достигать 500-летнего возраста в нетронутой среде обитания. Содоминантами древостоя выступают теневыносливые ель аянская (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carriere), пихта белокорая (*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.) и светолюбивая лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.). Не смотря на особый интерес ученых в последние годы к коренным лесам Дальнего Востока России [32], существует много пробелов в дендроклиматических исследованиях. Так, например, остается неизученным вопрос климатической чувствительности основных хвойных видов деревьев Среднего Сихотэ-Алиня.

Понимание климатического отклика основных лесообразующих пород и его изменение во времени сможет помочь оценить экономические последствия меняющихся условий и дать прогноз изменения устойчивости и потенциал восстановления лесов.

В связи с вышесказанным, целью исследования было выявить главный лимитирующий фактор роста основных хвойных видов Среднего Сихотэ-Алиня и какие виды деревьев наиболее чувствительны к изменению климата. В задачи входило оценить дифференцированный климатический сигнал и его изменение во времени хвойных видов хвойно-широколиственных лесов Среднего Сихотэ-Алиня; сравнить динамику климатической чувствительности среди видов деревьев; проследить климатические тренды за период метеонаблюдений.

### Материалы и методы

#### *Район исследования*

Сихотэ-Алиньский хребет – горный муссонный район, протянувшийся вдоль Японского моря на 1200 км. Он покрыт смешанными многоярусными хвойно-широколиственными лесами, которые характеризуются естественной динамикой разновозрастных деревьев. Сравнительный анализ климатической реакции 4 хвойных видов по 30-43 деревьям проведен на восточном макросклоне Сихотэ-Алиня на постоянных пробных площадях Сихотэ-Алинского заповедника, образованного в 1935 году (рис. 1).

Климат на восточном макросклоне Сихотэ-Алинского хребта муссонный, довольно мягкий и снежный с частыми тропическими циклонами с Японского моря: среднегодовая температура воздуха 5.3 °С, сумма годовых осадков составляет 828 мм, которые в основном выпадают в августе-сентябре. Январь – самый холодный месяц в году (в среднем -12,2 °С), август – самый теплый (в среднем +18 °С). Вегетационный период длится с мая по октябрь (рис. 2, А).



Рисунок 1. Район исследования. А. Карта района исследования. Б. Хвойно-широколиственный лес на месте отбора проб

Figure 1. Study site. A. Map of the study site. B. Image of the conifer-broadleaved forest at the sampling site

Источник: собственное фото автора

Source: the author's photo

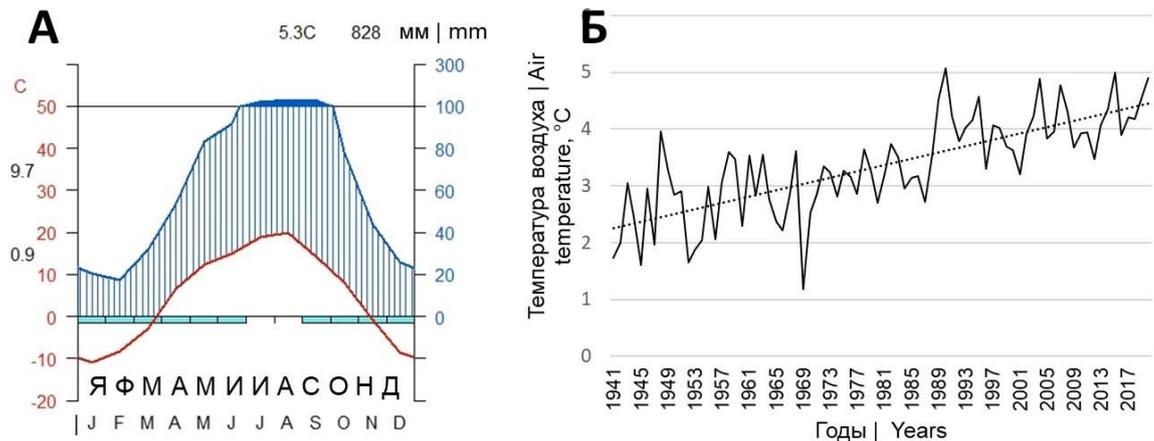


Рисунок 2. Климат юго-востока Дальнего Востока России (по данным метеостанции «Терней»). А. Walter-Lieth климатограмма: синяя линия: количество осадков, деленное на 2, а черная линия показывает количество осадков, деленное на 3; красная линия: температура воздуха; синие столбцы: появление суточных минимальных отрицательных температур. Вверху климатограммы показаны высота метеостанций н.у.м., среднегодовые температуры воздуха и количество осадков. Значения средних дневных минимумов и максимумов температуры воздуха показаны слева от шкалы температур черным цветом. Буквами на оси абсцисс обозначены календарные месяцы с января по декабрь. Б. Тренд среднегодовых температур метеостанции «Терней» за 1941-2019 гг.,  $R^2 = 0.5622$ .

Figure 2. Climate of the southeast of the Russian Far East (according to the Terney weather station). A. Walter-Lieth climatic diagram for Terney weather station: blue line: precipitation divided by 2 and the black line represents precipitation divided by 3; red line: temperature; blue bars: the appearance of daily minimum negative temperatures). The altitude of weather station above sea level, mean annual temperatures and precipitation are shown at the top of the climatogram. The average daily minimum and maximum air temperatures are shown to the left of the temperature scale in black. The letters on the x-axis indicate the calendar months from January to December. B. Trend of annual mean temperatures for Terney weather station for 1941-2019,  $R^2 = 0.5622$ .

Источник: собственные вычисления авторов

Source: the authors' composition

Климатограмма построена с помощью пакета climato1 в R Studio [12]. Среднегодовая температура воздуха выросла за последние 78 лет более чем на 2 °С (рис. 2Б). По данным открытой базы данных метеорологической станции «Терней» (N 45°00', E 136°60', <http://meteo.ru/>) [3], анализ временных тенденций за период с 1941 по 2019 год показал прирост температуры на 0.24°С за десятилетие, тогда как существенных тенденций по осадкам не наблюдалось.

*Методы исследования*

Сбор и камеральная обработка образцов древесины, проводилась согласно стандартным методам и принципам дендрохронологии [51]. Керны были отшлифованы и отсканированы с помощью сканера Epson perfection V800 photo (Япония). По полученным изображениям, разрешением не менее 2400 dpi измерена ширина годичных колец (ШКГ) в полуавтоматическом режиме с помощью программного обеспечения Coorecorder [20], TSAP-Win [28]. Для анализа были отобраны наиболее чувствительные к климату деревья разных видов хвойных Среднего Сихотэ-Алиня: *P. koraiensis* возрастом до 341 года, *A.*

*Nephrolepis* – до 181 года, *P. jezoensis* – до 278 лет, *L. Gmelinii* – до 282 лет. Выборки деревьев были перекрестно датированы и визуально проверены с использованием COFESHA [14], стандартизированы, а остаточные хронологии сопоставлены с основными климатическими факторами с 1941 года с использованием пакетов «dplR» и «treeclim» программного обеспечения R-Studio [9, 40]. Для стандартизации выбран метод модифицированной отрицательной экспоненциальной кривой [9]. В работе рассматривается реакция деревьев на климатические факторы, с которыми есть значимая достоверная связь (среднемесячная температура воздуха, среднемесячная сумма осадков). Для проверки изменения климатической чувствительности у выбранных деревьев в пакете «treeclim» за тот же период были выполнены скользящие корреляции прироста со среднемесячными значениями климатических переменных с января по ноябрь текущего года с окном 35 лет.

Таблица 1  
Статистическая характеристика остаточных хронологий ШКГ хвойных видов

Table 1

Statistical characteristics of residual TRW chronologies of conifer species

	<i>P. koraiensis</i>	<i>A. nephrolepis</i>	<i>L. gmelinii</i>	<i>P. jezoensis</i>
Средняя чувствительность (MS)   Mean sensitivity (MS)	0.206	0.297	0.264	0.205
Выраженный сигнал популяции (EPS)   Expressed population signal (EPS)	0.923	0.901	0.936	0.873
Межсерийный коэффициент корреляции (Rbar)   Mean inter-serial correlation	0.798	0.476	0.626	0.466

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

## Результаты и обсуждение

Статистическая характеристика остаточных хронологий всех видов деревьев показала, что размер выборки оптимален для анализа, керны скоррелированы между собой ( $R_{\text{bar}} > 0.46$ ), но отличаются локальными условиями. Деревья чувствительны к климатическим факторам ( $MS > 0.2$ ),  $EPS > 0.87$  для всех хронологий, что делает их достаточно представительными [6] (табл. 1).

Выявлена климатическая реакция основных хвойных видов Среднего Сихотэ-Алиня (*P. koraiensis*, *A. nephrolepis*, *P. jezoensis*, *L. gmelinii*) на среднемесячную сумму осадков и среднемесячную температуру воздуха. Получены результаты по динамике климатической чувствительности за период 78 лет. Как можно заметить на рисунках 3, 4, 5, 7 тенденции по видам отличаются, но имеются схожие тренды по месяцам.

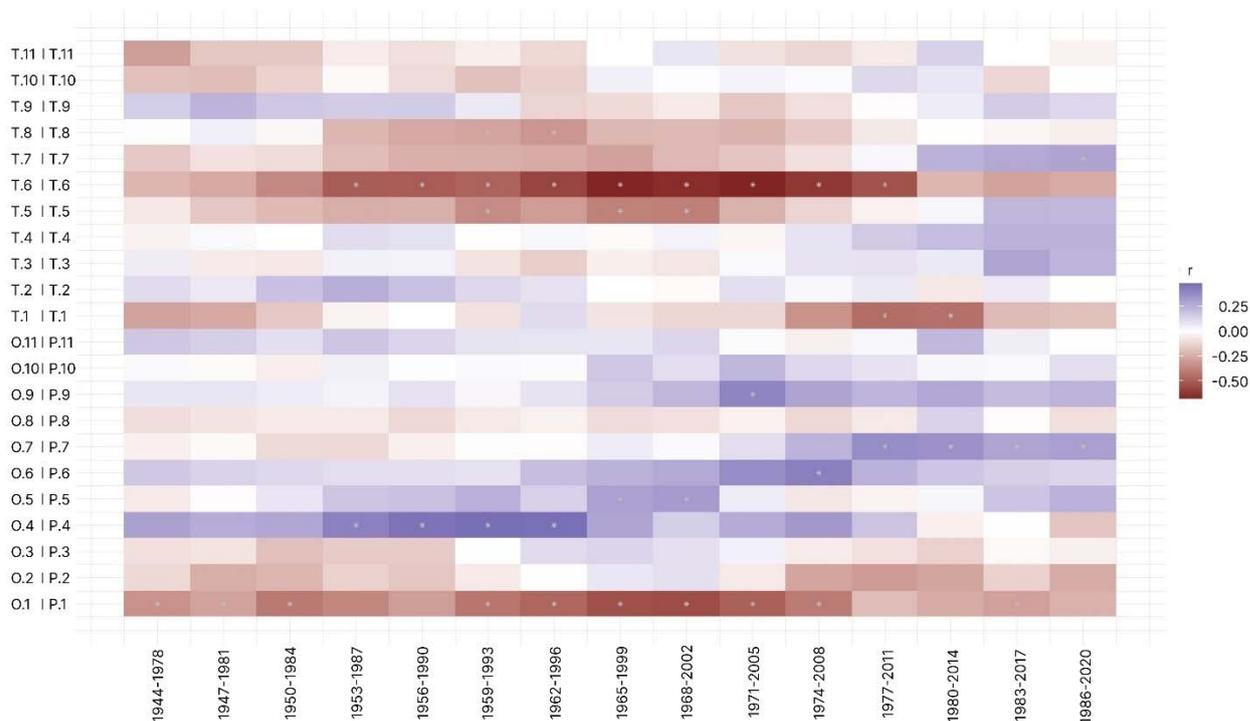


Рисунок 3. Скользящая корреляционная зависимость ШГК *P. koraiensis* со среднемесячными температурами (Т) и суммой осадков (О) с января по ноябрь (1-11) текущего года роста с длиной окна 35 лет. Показаны факторы, значимо коррелирующие с ШГК (коэффициент корреляции Пирсона). Коэффициенты значимы при  $r > 0.271$  и  $p < 0.05$  и отмечены «\*»

Figure 3. Moving correlation of *P. koraiensis* TRW with mean monthly temperatures (T) and total precipitation (O) from January to November (1-11) of the current year of growth with a window length of 35 years. Factors that significantly correlate with tree ring width are shown (Pearson's correlation coefficient). Coefficients are significant at  $r > 0.271$  and  $p < 0.05$  and are marked with «\*»

Источник: собственные вычисления авторов

Source: the authors' composition

Результат корреляционного анализа показал, что для кедра корейского самая сильная отрицательная связь со среднемесячной температурой была обнаружена с январем и июнем текущего года роста, а с осадками – положительная связь с апрелем и отрицательная с январем на

протяжении нескольких десятилетий (рис. 3). Несмотря на то, что кедр – лесобразующий доминирующий вид первого яруса, он теневынослив в молодом возрасте и морозоустойчив [31]. Более того, корейская сосна имеет неглубокую корневую систему,

чувствительна к влажности почвы и хорошо растет при относительной влажности выше 70% [38].

Растущая температура июня ограничивает годичный прирост кедра. Для кедров корейского отмечено снижение роста молодых деревьев и деревьев на юге региона в ответ на повышение температуры в Китае [35]. Авторы также отметили, что засуха, вызванная потеплением климата, является основной причиной гибели молодых деревьев. Одной из вероятных причин отрицательного влияния высоких температур вегетационного сезона на жизнеспособность сосны корейской могут быть более высокие потери углерода из-за увеличения дыхания и снижения доступности углеводов для роста [21]. В своем анализе мы использовали достаточно старые деревья возрастом до 341 лет, что объясняет их относительную устойчивость к изменению климата. Однако, старовозрастные кедров более чувствительны к высоким температурам и низкому количеству осадков, чем молодые [35]. Wang с соавторами показал, что у старых деревьев *Pinus koraiensis* базальный прирост площади (BAI) либо снизился незначительно, либо стабилизировался с 1980-х гг, в то время как BAI молодых деревьев значительно и резко снизился [35].

Устойчивое отрицательное влияние июньских температур на рост кедров подтверждается предыдущим исследованиям по юго-восточной Азии, которые показали, что доступность воды в начале вегетационного периода

имеет решающее значение для роста [35, 36]. Повышение температуры за вегетационный период (май – октябрь) в сочетании с постоянным количеством осадков (рис. 6) может вызвать у деревьев термический стресс. Эти условия могут повысить скорость эвапотранспирации, что может снизить уровень накопленных углеводов и, в конечном итоге, привести к снижению ширины кольца [11].

Повышение температуры вегетационного периода может также увеличить потребность растений в почвенной влаге и их транспирацию, что ухудшает сокодвижение в тканях деревьев [19]. Эти процессы замедляют рост деревьев из-за ограничений доступности воды для фотосинтеза, закрытием устьиц [1, 7, 37]. Кроме того, возможно, что более высокие температуры могут превысить температурный порог фотосинтеза и вызвать снижение ассимиляции CO<sup>2</sup> [25]. В целом, высокие температуры могут привести к снижению биологической устойчивости хвойных видов к вспышкам патогенов и климатически обусловленным пожарам [47].

В нашем исследовании сумма осадков апреля имела положительное влияние на рост кедров за период 1953-1996 гг. (рис. 3). Некоторые исследователи обнаружили, что не только температура февраля-апреля была важным фактором для роста сосны корейской в Китае, но и осадки, особенно при их недостатке [22, 42].

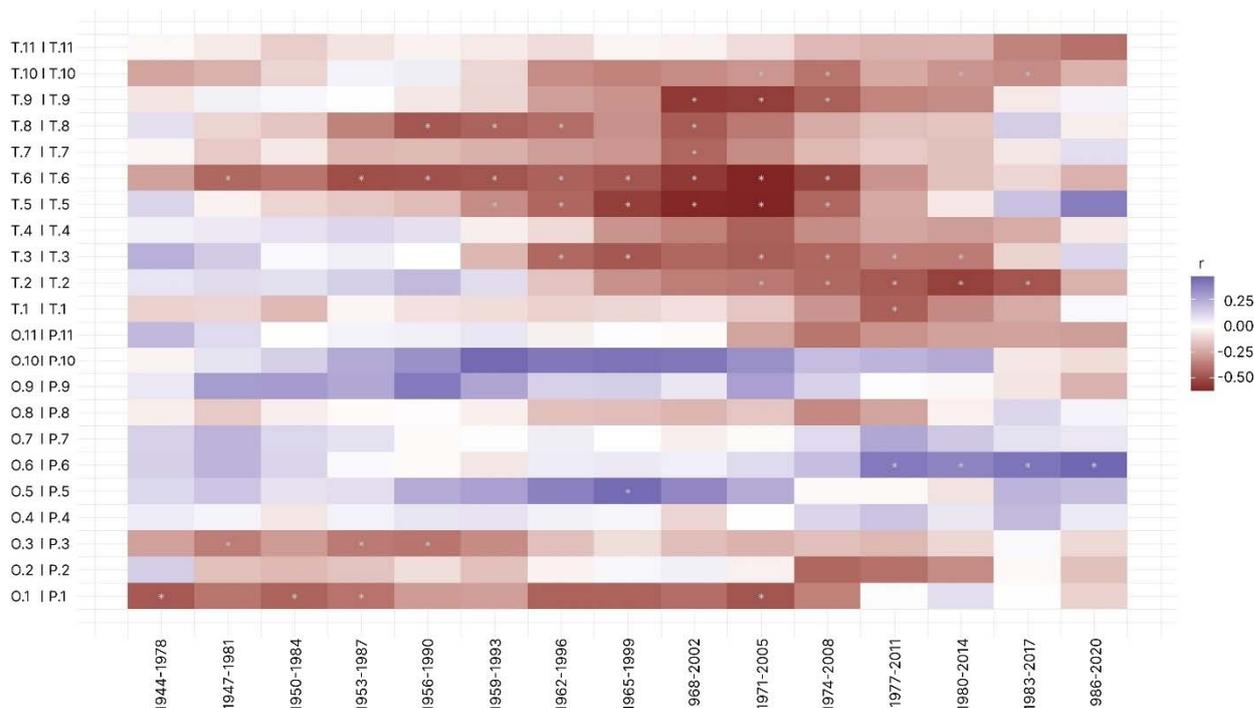


Рисунок 4. Скользящая корреляционная зависимость ШГК *L. gmelinii* со среднемесячными температурами (Т) и суммой осадков (О) с января по ноябрь (1-11) текущего года роста с длиной окна 35 лет. Показаны факторы, значимо коррелирующие с ШГК (коэффициент корреляции Пирсона). Коэффициенты значимы при  $r > 0.284$  и  $p < 0.05$  и отмечены «\*»

Figure 3. Moving correlation of *L. gmelinii* TRW with mean monthly temperatures (T) and total precipitation (O) from January to November (1-11) of the current year of growth with a window length of 35 years. Factors that significantly correlate with tree ring width are shown (Pearson's correlation coefficient). Coefficients are significant at  $r > 0.284$  and  $p < 0.05$  and are marked with «\*».

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: the authors' composition

Лиственница Гмелина показала значимый отрицательный отклик на среднемесячные температуры вегетационного сезона, который ослабевает со временем (рис. 4). Самая сильная отрицательная корреляционная связь наблюдается в мае-июне и сентябре. На севере Китая также обнаружено, что радиальный рост лиственницы Гмелина на склонах холмов снизился из-за недавнего потепления климата [4]. Более того, летняя температура (июнь-август) в целом является основным лимитирующим фактором роста лиственницы Гмелина на северо-востоке Китая, что подтверждено рядом работ [17, 39].

ШГК лиственницы отрицательно коррелирует с температурой воздуха февраля-марта (перед началом сезона роста). Несколько

исследований показали, что зимне-весенние температуры ограничивают радиальный рост различных видов деревьев [8, 10, 30]. Хотя высокая зимняя температура воздуха может оказывать меньшее повреждение корней и спящих почек, что должно давать меньшее ограничение роста в следующем году [23].

Радиальный прирост лиственницы имеет отрицательную корреляционную связь с суммой осадков января и положительную – с осадками мая-июня. Лиственница Гмелина менее чувствительна к осадкам, чем к температуре воздуха [41]. После 1976 г. (до 2010 г.) климатическая чувствительность лиственницы в июне меняется с температуры на осадки. На севере Китая ученые также обнаружили, что взаимосвязи ШГК

лиственницы Гмелина с климатическими параметрами изменились с отрицательной корреляции до 1980 года на положительную корреляцию после 1980 года [39]. Это явление в совокупности с климатическим трендом (рис. 6) свидетельствует о том, что растущая температура повышает транспирацию деревьев и даже может привести к сбросу хвои лиственницы, так как она не закрывает свои устьица как другие хвойные

виды. Согласно исследованиям климата России [45], интервал после 1976 года выделяется как период наиболее интенсивного потепления. Авторы также отмечают, что в Приморье число летних дней с аномально высокой температурой повышается наиболее быстро, и увеличение сумм годовых осадков, наоборот, происходит довольно медленно (по 0,5 мм/месяц за 10 лет).

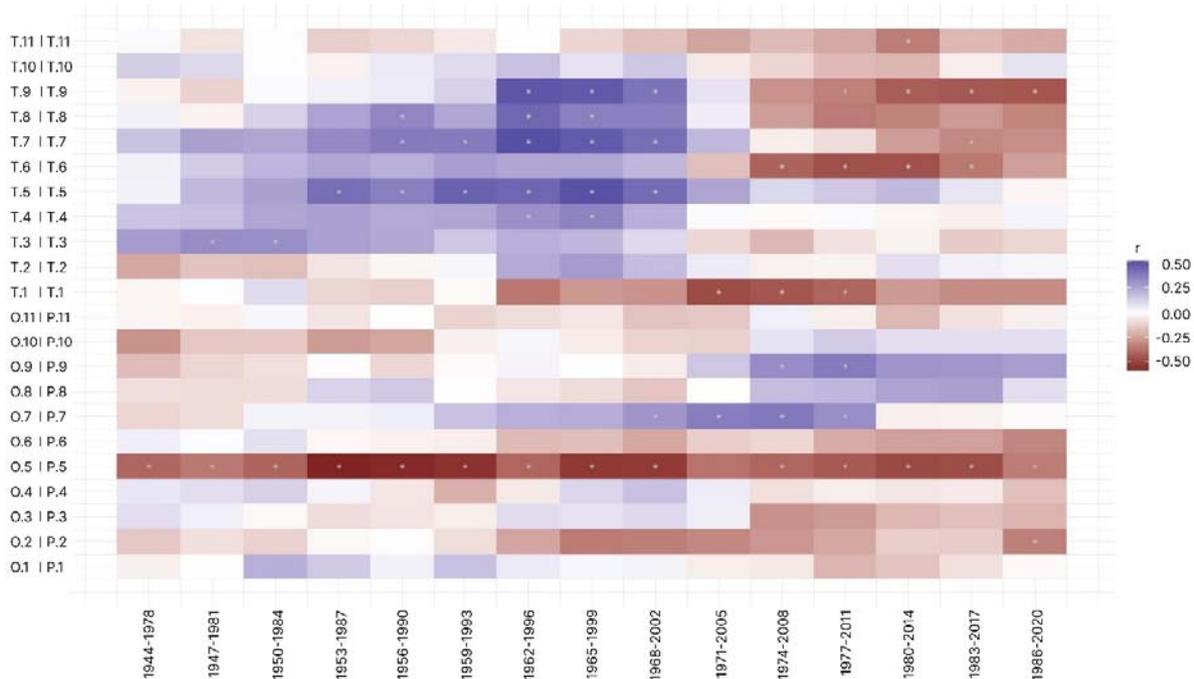


Рисунок 5. Скользящая корреляционная зависимость ШГК *P. jezoensis* со среднемесячными температурами (Т) и суммой осадков (О) с января по ноябрь (1-11) текущего года роста с длиной окна 35 лет. Показаны факторы, значимо коррелирующие с ШГК (коэффициент корреляции Пирсона). Коэффициенты значимы при  $r > 0.308$  и  $p < 0.05$  и отмечены «\*»

Figure 3. Moving correlation of *P. jezoensis* TRW with mean monthly temperatures (T) and total precipitation (O) from January to November (1-11) of the current year of growth with a window length of 35 years. Factors that significantly correlate with tree ring width are shown (Pearson's correlation coefficient). Coefficients are significant at  $r > 0.308$  and  $p < 0.05$  and are marked with «\*»

Источник: собственные вычисления авторов

Source: the authors' composition

Положительное влияние майской температуры на ель аянскую со временем ослабевает, но общее количество осадков по-прежнему отрицательно влияет на радиальный рост деревьев (рис. 5). Сумма осадков мая является основным климатическим фактором, ограничивающим рост ели в начале вегетационного сезона. В добавок к этому, после 1970-х гг.

среднемесячные температуры июня-сентября начали отрицательно влиять на ее прирост, что можно объяснить климатическими трендами (рис. 6). Другие дендроклиматологические исследования подтверждают наши результаты, что характер роста и взаимосвязь роста и климата ели (*P. jezoensis* var. *microsperma*) на северо-востоке Китая значительно изменились примерно в 1980 году [43].

Климат влияет на рост годичных колец, изменяя влажность почвы. По некоторым данным существует запаздывание в реакции прироста ели на засушливые условия летних месяцев [44]. Так, по данным М.С. Александровой с соавторами, европейская ель демонстрирует запаздывающую на год отрицательную реакцию на летние засухи. Этот вопрос остается малоизученным, но актуальным из-за повсеместного усыхания елово-пихтовых лесов.

При адаптации вечнозеленых хвойных деревьев к засухам замедляется фотосинтез, происходит закрытие устьиц, что в конечном итоге приводит к формированию узкого годичного кольца. Высокие температуры в мае и июне могут привести к увеличению транспирации и, таким образом, уменьшить запасенные вещества на следующий год. Для роста клеток камбия в начале

вегетационного периода может использоваться материал, накопленный в предыдущем году, из которого производится большая часть ранней древесины ели. Предыдущие исследования показали, что около половины ширины кольца ели формируется в начале вегетационного периода [48]. Ель в силу своей экологии и физиологии (влаголюбивый, нетребовательный к теплу вид) более чувствительна к осадкам начала вегетации, чем пихта, что делает этот вид более уязвимым к засухам. В Приморье в хвойно-широколиственных лесах высокая теплообеспеченность, но неустойчивое увлажнение, что, главным образом, определяет распространение ели по долинам водотоков и на северных склонах.

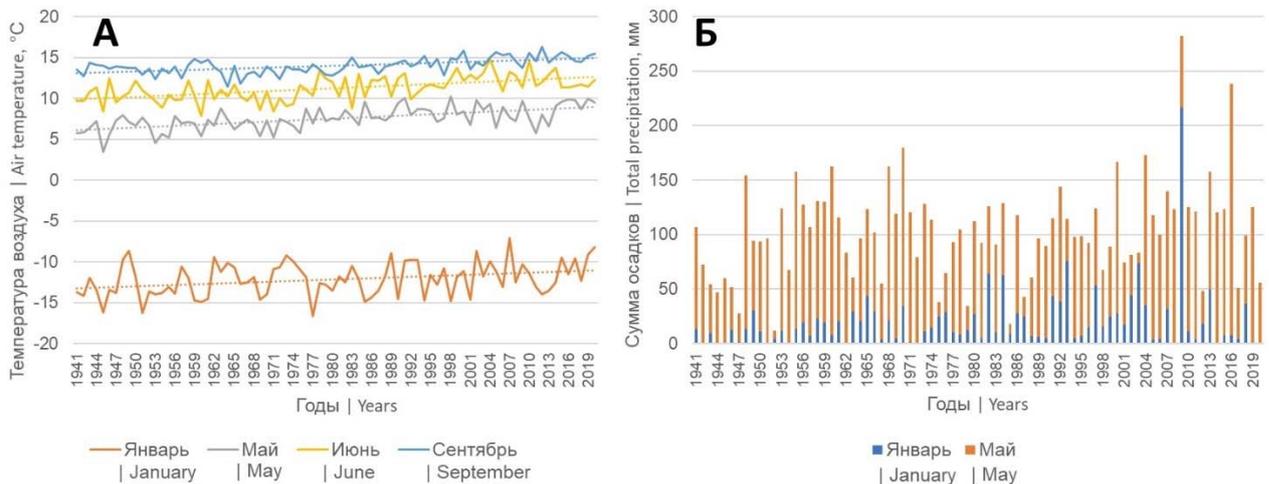


Рисунок 6. Климатические тренды за 1941-2019 гг. в Приморском крае (метеостанция «Терней»):  
 А. Среднемесячная температура января (R = 0.1), мая (R = 0.38), июня (R = 0.31), сентября (R = 0.34), °C

Б. Среднемесячная сумма осадков января (R = 0.05), мая (R = 0.01), мм

Figure 6. Climate trends for 1941-2019 in the Primorsky territory (Terney weather station): A. Mean monthly temperature in January (R = 0.1), May (R = 0.38), June (R = 0.31), September (R = 0.34), °C

В. Mean monthly total precipitation in January (R = 0.05), May (R = 0.01), mm

Источник: meteo.ru

Source: meteo.ru

На рис. 6 показаны климатические тренды, с которыми зафиксирована значимая корреляционная связь у хвойных видов Приморья. Как можно заметить, за исследуемый период отмечен как рост температур, так и количества осадков. Однако, темпы увеличения среднемесячной суммы осадков не сопоставимы с температурой. Больше всего

выросла температура начала и конца вегетационного сезона (май, июнь, сентябрь), что не могло не отразиться на росте деревьев. Рост температур может вызвать изменения атмосферной циркуляции [15] и деревья будут вынуждены придерживаться стратегии адаптации к водному стрессу [24].

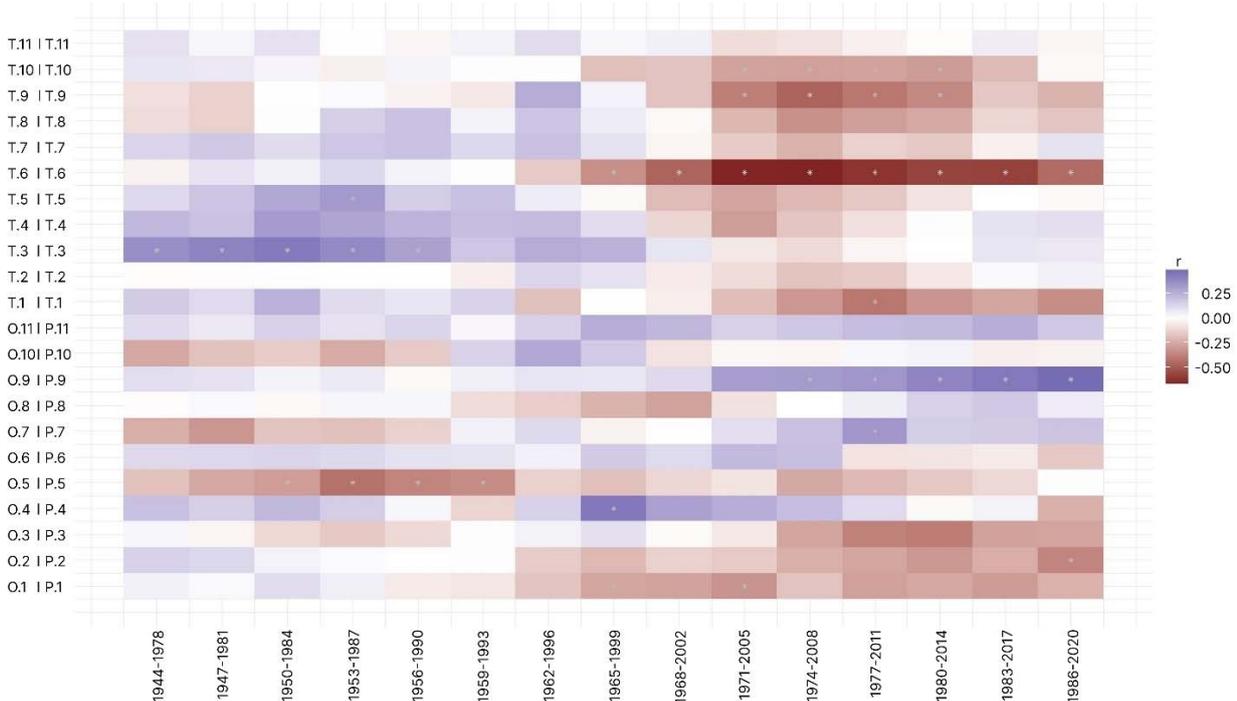


Рисунок 7. Скользящая корреляционная зависимость ШГК *A. nephrolepis* со среднемесячными температурами (Т) и суммой осадков (О) с января по ноябрь (1-11) текущего года роста с длиной окна 35 лет. Показаны факторы, значимо коррелирующие с ШГК (коэффициент корреляции Пирсона). Коэффициенты значимы при  $r > 0.227$  и  $p < 0.05$  и отмечены «\*»

Figure 3. Moving correlation of *A. nephrolepis* TRW with mean monthly temperatures (T) and total precipitation (O) from January to November (1-11) of the current year of growth with a window length of 35 years. Factors that significantly correlate with tree ring width are shown (Pearson's correlation coefficient). Coefficients are significant at  $r > 0.227$  and  $p < 0.05$  and are marked with «\*».

Источник: собственные вычисления авторов

Source: the authors' composition

Для пихты белокорой была обнаружена самая высокая прогрессивная отрицательная корреляция с температурой июня и положительная с количеством осадков сентября (рис. 6). Растущая температура начала вегетационного сезона увеличивает рост пихты, что объясняется её теплолюбивостью и недостаточным количеством осадков, что делает их главными лимитирующими факторами роста пихты в Приморье. В Среднем Сихотэ-Алине пихта лучше ели переносит застойное увлажнение почвы, она более теплолюбива и теневынослива [46]. Основная часть ценопопуляции пихты растёт под пологом ели, благодаря чему влияние флуктуаций погодноклиматических факторов на пихту смягчено древесным пологом. Но она испытывает

фитоценотический стресс в борьбе за свет, влагу и питательные вещества.

Климат опосредованно влияет на устойчивость видов к внешним воздействиям. Он может замедлять ростовые процессы в начале вегетационного периода, что ослабляет дерево. Оно становится более подвержено воздействию пожаров, вредителей и других нарушений экосистем. Что в конечном итоге может привести к усыханию деревьев. Усыхание пихтово-еловых лесов объясняется реакцией деревьев на изменение водного режима почвы. Обе породы имеют поверхностную корневую систему, что делает их незащищенными от резких колебаний влажности поверхностных почвенных горизонтов. Согласно Ю.И. Манько с соавторами [46], при сильных

засухах усыхание древостоев происходит внезапно (видно по приросту - он не снижается перед гибелью).

Текущие тенденции потепления климата и последующее изменение климатической чувствительности основных лесообразующих видов неминуемо ведут к изменению сукцессионного режима и, следовательно, породного состава древостоев [29]. Некоторые ученые считают, что дефицит влаги в корнеобитаемом слое почвы, особенно резкое изменение водного режима почвы (вследствие высокого испарения и малых осадков, т.е. засухи) может привести к гибели лесов [35, 47]. Значительный сдвиг климата в сторону более теплых и засушливых условий имеет важные последствия для экосистемных услуг, которые хвойные виды предоставляет региону.

### Выводы

1. Среднемесячные температуры мая, июня и сентября значимо выросли более чем на 2°C за

последние 78 лет в пределах Среднего Сихотэ-Алиня.

2. Быстрорастущая температура воздуха оказывает наибольшее отрицательное влияние на годичный прирост всех исследованных видов хвойных (*P. koraiensis*, *A. nephrolepis*, *P. jezoensis*, *L. gmelinii*), чем осадки, что делает ее главным лимитирующим фактором роста. Она может повышать транспирацию деревьев и замедлять скорость фотосинтеза.

3. Наиболее климатически чувствительными видами среди изученных оказались лиственница Гмелина и ель аянская. Ускоряющиеся темпы потепления климата после 1976 года отрицательно отразились на годичном приросте деревьев. Эти виды наиболее уязвимы к засухам в силу своей экологии и физиологии, и их ареал произрастания может сместиться на север при дальнейшем повышении среднемесячной температуры воздуха вегетационного сезона.

### Список литературы

1. Adams H. D. [et al.] Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought // Proceedings of the national academy of sciences, 2009, Vol. 106, Iss. 17, pp. 7063-7066. DOI: 10.1073/pnas.0901438106.
2. Allen C. D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N. [et al.] A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // Forest Ecology and Management, 2010, Vol. 259, Iss. 4, pp. 660-684. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.001 ff. fhal00457602f
3. All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Centre (RIHMI-WDC). – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 20.08.2023).
4. Bai X. P. [et al.] Impacts of rapid warming on radial growth of *Larix gmelinii* on two typical micro-topographies in the recent 30 years // Ying Yong Sheng tai xue bao - The Journal of Applied Ecology, 2016, Vol. 27, Iss. 12, pp. 3853-3861. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201612.036.
5. Boulanger Y. [et al.] Climate change impacts on forest landscapes along the Canadian southern boreal forest transition zone // Landscape Ecology, 2017, Vol. 32, pp. 1415-1431. DOI: 10.1007/s10980-016-0421-7.
6. Briffa K. R., Jones P. D., Basic chronology statistics and assessment // Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences E. R. Cook, and L. A. Kairiukstis, Kluwer Acad., Norwell, Mass., 1990, pp. 137–152. – URL: <https://www.springer.com/gb/book/9780792305866>
7. Brito P. [et al.] Increased water use efficiency does not prevent growth decline of *Pinus canariensis* in a semi-arid treeline ecotone in Tenerife, Canary Islands (Spain) // Annals of forest science, 2016, Vol. 73, pp. 741-749. DOI: 10.1007/s13595-016-0562-5.
8. Brubaker L. B. Spatial patterns of tree growth anomalies in the Pacific Northwest // Ecology, 1980, Vol. 61, Iss. 4, pp. 798-807. DOI: doi.org/10.2307/1936750.
9. Bunn A. G. A dendrochronology program library in R (dplR) // Dendrochronologia, 2008, Vol. 26, Iss. 2, pp. 115-124. DOI: 10.1016/j.dendro.2008.01.002.

10. Cook E. R. [et al.] Identifying functional groups of trees in west Gulf Coast forests (USA): a tree-ring approach // Ecological application, 2001, Vol. 11, Iss. 3, pp. 883-903. DOI: 10.1890/1051-0761(2001)011[0883:IFGOTI]2.0.CO;2.
11. Fritts H. C. Tree rings and climate // Academic Press, London, 1976, 567p. URL: <https://shop.elsevier.com/books/tree-rings-and-climate/fritts/978-0-12-268450-0>.
12. Guijarro J. A., Guijarro M. J. A. Package 'climatol'. 2019. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/climatol/climatol.pdf> (дата обращения: 21.07.2023).
13. Halofsky J. E., Peterson D. L., Harvey B. J. Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA // Fire Ecology, 2020, Vol. 16, Iss. 1, pp. 1-26. DOI: 10.1186/s42408-019-0062-8.
14. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin, 1983, 43, pp. 69-78. URL: [https://www.ltr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Holmes\\_1983.pdf](https://www.ltr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Holmes_1983.pdf).
15. Hoy A., Sepp M., Matschullat J. Large-scale atmospheric circulation forms and their impact on air temperature in Europe and northern Asia // Theoretical and applied climatology, 2013, Vol 113, pp. 643-658. DOI: 10.1007/s00704-012-0813-9.
16. IPCC AR6 WGI. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата обращения: 10.10.2023).
17. Jiang Y. et al. Radial growth response of *Larix gmelinii* to climate along a latitudinal gradient in the Greater Khingan Mountains, Northeastern China // Forests, 2016, Vol. 7, Iss. 12, pp. 295. DOI: 10.3390/f7120295.
18. Karl T. R., Trenberth K. E. Modern global climate change // Science, 2003, Vol. 302, Iss. 5651, pp. 1719-1723. DOI: 10.1126/science.109022.
19. Köcher P. [et al.] Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies // Annals of Forest Science, 2009, Vol. 66, Iss. 1, pp. 1. DOI: 10.1051/forest/2008076.
20. Larsson L. Å. CDendro & CooRecorder software dendrochronology measurements and dating, version 9.3.1. 2019. URL: <http://www.cybis.se/forfun/dendro>.
21. Lavigne M. B., Ryan M. G. Growth and maintenance respiration rates of aspen, black spruce and jack pine stems at northern and southern BOREAS sites // Tree Physiology, 1997, Vol. 17, Iss. 8-9, pp. 543-551. DOI: 10.1093/treephys/17.8-9.543.
22. Lyu S. [et al.] Different responses of Korean pine (*Pinus koraiensis*) and Mongolia oak (*Quercus mongolica*) growth to recent climate warming in northeast China // Dendrochronologia, 2017, Vol. 45, pp. 113-122. DOI: 10.1016/j.dendro.2017.08.002.
23. Pederson N. [et al.] The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern range margin tree species // Dendrochronologia, 2004, Vol. 22, Iss. 1, pp. 7-29. DOI: 10.1016/j.dendro.2004.09.005.
24. Peguero-Pina J. J. et al. Living in drylands: Functional adaptations of trees and shrubs to cope with high temperatures and water scarcity // Forests, 2020, Vol. 11, Iss. 10, P.1028. DOI: 10.3390/f11101028.
25. Peñuelas J., Canadell J. G., Ogaya R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth // Global Ecology and Biogeography, 2011, Vol. 20, Iss. 4, pp. 597-608. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00608.x.
26. Perez-Garcia J. [et al.] Impacts of climate change on the global forest sector // Climatic change, 2002, Vol. 54, pp. 439-461. DOI: 10.1023/A:1016124517309
27. Petr M. [et al.] Inconsistent recognition of uncertainty in studies of climate change impacts on forests // Environmental Research Letters, 2019, Vol. 14, Iss. 11. P. 113003. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4670.

28. Rinn F. TSAP-Win professional // Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications, 2007, P. 20. URL: <http://www.rinntech.de/index-28703.html>.
29. Soja A. J., Tchebakova N. M., French N. H. F. [et al.] Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations // Global and Planetary Change, 2007, Vol. 56, Iss. 34, pp. 274–296. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.028.
30. Tardif J., Brisson J., Bergeron Y. Dendroclimatic analysis of *Acer saccharum*, *Fagus grandifolia*, and *Tsuga canadensis* from an old-growth forest, southwestern Quebec // Canadian Journal of Forest Research, 2001, Vol. 31, Iss. 9, pp. 1491-1501. DOI: 10.1139/x01-088.
31. Thomas P., Farjon A. *Pinus koraiensis*. The IUCN Red List of Threatened Species // UK, 2013, Vol. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN>.
32. Ukhvatkina O. [et al.] Tree-ring-based spring precipitation reconstruction in the Sikhote-Alin' Mountain range // Climate of the Past, 2021, Vol. 17, Iss. 2, pp. 951-967. DOI: 10.5194/cp-17-951-2021.
33. Venäläinen A. [et al.] Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review // Global change biology, 2020, Vol. 26, Iss. 8, pp. 4178-4196. DOI: 10.1111/gcb.15183.
34. Wang H. [et al.] The impacts of climate change on the radial growth of *Pinus koraiensis* along elevations of Changbai Mountain in northeastern China // Forest Ecology and Management, 2013, Vol. 289, pp. 333-340. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.10.023.
35. Wang X. [et al.] Recent rising temperatures drive younger and southern Korean pine growth decline // Science of the Total Environment, 2019, Vol. 649, pp. 1105-1116. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.393.
36. Wang X. [et al.] Temperature signals in tree-ring width and divergent growth of Korean pine response to recent climate warming in northeast Asia // Trees, 2017, Vol. 31, pp. 415-427. DOI: 10.1007/s00468-015-1341-x.
37. Way D. A., Sage R. F. Elevated growth temperatures reduce the carbon gain of black spruce [*Picea mariana* (Mill.) BSP] // Global Change Biology, 2008, Vol. 14, Iss. 3, pp. 624-636. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01513.x.
38. Wu C. Y., Raven P. H., Hong D. Y. Flora of China (Cycadaceae through Fagaceae) // Science Press, Beijing & St. Louis, 1999, Vol. 4. URL: <http://flora.huh.harvard.edu/china/mss/volume04/index.htm>.
39. Yasmeeen S. [et al.] Contrasting climate-growth relationship between *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* along a latitudinal gradient in Daxing'an Mountains, China // Dendrochronologia, 2019, Vol. 58, pp. 125645. DOI: 10.1016/j.dendro.2019.125645.
40. Zang C., Biondi F., Zang M. C. Package 'treeclim', 2022. URL: <https://cran.rstudio.org/web/packages/treeclim/treeclim.pdf>.
41. Zhang P., Liu B. Effect of climate change on *Larix gmelinii* growth in different latitudes // J. Northeast For. Univ, 2015, Vol. 43, pp. 10-13. URL: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotol-DBLY201503003.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotol-DBLY201503003.htm).
42. Zhu H. F. [et al.] Tree ring-based February–April temperature reconstruction for Changbai Mountain in Northeast China and its implication for East Asian winter monsoon // Climate of the Past, 2009, Vol. 5, Iss. 4, pp. 661-666. DOI: 10.5194/cp-5-661-2009.
43. Zhu L. [et al.] Rapid warming induces the contrasting growth of Yezo spruce (*Picea jezoensis* var. *microsperma*) at two elevation gradient sites of northeast China // Dendrochronologia, 2018, Vol. 50, pp. 52-63. DOI: 10.1016/j.dendro.2018.05.002.
44. Александрова, М. С. и др. Дендрохронологическая информация в лесоводственных исследованиях / М.С. Александрова, В.В. Коровин, С.А. Коротков, А.М. Крылов, В.А. Липаткин, Д.Е. Румянцев и др. // Московский государственный университет леса. – 2007. – 138 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19510954>.
45. Груза, Г. В. и др. Особенности температурного режима у поверхности Земного шара в 2018 году / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, И.А. Корнева и др. // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – Т. 1. – С. 97-127. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38585118>.

46. Манько, Ю. И., Гладкова, Г. А. Массовое усыхание пихтово-еловых лесов на российском Дальнем Востоке: основные итоги изучения / Ю. И. Манько, Г. А. Гладкова // Комаровские чтения. – 2003. – №. 49. – С. 131-171. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28286431>.
47. Павлов, И. Н. Биотические и абиотические факторы усыхания хвойных лесов Сибири и Дальнего Востока / И. Н. Павлов // Сибирский экологический журнал. – 2015. – Т. 22. – №. 4. – С. 537-554. – URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/0bf/0bf4ab0bfd414515f541bdc0e632251.pdf>.
48. Румянцев, Д. Е., Кухта, А. Е., Пучинская, Д. В. Климатический сигнал засух в хронологии ели из кисличного типа леса Центрально-лесного заповедника / Д. Е. Румянцев, А. Е. Кухта, Д. В. Пучинская // Лесной вестник/Forestry bulletin. – 2016. – Т. 20. – №. 2. – С. 36-43. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskii-signal-zasuh-v-hronologii-eli-iz-kislichnogo-tipa-lesa-tsentralno-lesnogo-zapovednika>.
49. Русакова, Ю. А. ООН: в повестке дня – проблема изменения климата / Ю. А. Русакова // Вестник МГИМО-Университета. – 2021. – №. 4 (13). – С. 286-294. – URL: <https://www.vestnik.mgimo.ru/jour/article/download/2919/2374>.
50. Соловьев, К. П. Кедрово-широколиственные леса Дальнего Востока и хозяйство в них / К.П. Соловьев // Хабаровск: Кн. Изд-во. – 1958. – 325 с.
51. Шиятов, С. Г. и др. Методы дендрохронологии / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов и др. // КрасГАУ, Учебно-методическое пособие. – 2000. – 80 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18801379>.

### References

1. Adams H. D. [et al.] Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought // Proceedings of the national academy of sciences, 2009, Vol. 106, Iss. 17, pp. 7063-7066. DOI: 10.1073/pnas.0901438106.
2. Allen C. D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N. [et al.] A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // Forest Ecology and Management, 2010, Vol. 259, Iss. 4, pp. 660-684. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
3. All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Centre (RIHMI-WDC). – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 20.08.2023).
4. Bai X. P. [et al.] Impacts of rapid warming on radial growth of *Larix gmelinii* on two typical microtopographies in the recent 30 years // Ying Yong Sheng tai xue bao - The Journal of Applied Ecology, 2016, Vol. 27, Iss. 12, pp. 3853-3861. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201612.036.
5. Boulanger Y. [et al.] Climate change impacts on forest landscapes along the Canadian southern boreal forest transition zone // Landscape Ecology, 2017, Vol. 32, pp. 1415-1431. DOI: 10.1007/s10980-016-0421-7.
6. Briffa K. R., Jones P. D., Basic chronology statistics and assessment // Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences E. R. Cook, and L. A. Kairiukstis, Kluwer Acad., Norwell, Mass., 1990, pp. 137–152. – URL: <https://www.springer.com/gb/book/9780792305866>
7. Brito P. [et al.] Increased water use efficiency does not prevent growth decline of *Pinus canariensis* in a semi-arid treeline ecotone in Tenerife, Canary Islands (Spain) // Annals of forest science, 2016, Vol. 73, pp. 741-749. DOI: 10.1007/s13595-016-0562-5.
8. Brubaker L. B. Spatial patterns of tree growth anomalies in the Pacific Northwest // Ecology, 1980, Vol. 61, Iss. 4, pp. 798-807. DOI: [doi.org/10.2307/1936750](https://doi.org/10.2307/1936750).
9. Bunn A. G. A dendrochronology program library in R (dplR) // Dendrochronologia, 2008, Vol. 26, Iss. 2, pp. 115-124. DOI: 10.1016/j.dendro.2008.01.002.
10. Cook E. R. [et al.] Identifying functional groups of trees in west Gulf Coast forests (USA): a tree-ring approach // Ecological application, 2001, Vol. 11, Iss. 3, pp. 883-903. DOI: 10.1890/1051-0761(2001)011[0883:IFGOTI]2.0.CO;2.

11. Fritts H. C. Tree rings and climate // Academic Press, London, 1976, 567p. URL: <https://shop.elsevier.com/books/tree-rings-and-climate/fritts/978-0-12-268450-0>.
12. Guijarro J. A., Guijarro M. J. A. Package 'climatol'. 2019. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/climatol/climatol.pdf> (дата обращения: 21.07.2023).
13. Halofsky J. E., Peterson D. L., Harvey B. J. Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA // Fire Ecology, 2020, Vol. 16, Iss. 1, pp. 1-26. DOI: 10.1186/s42408-019-0062-8.
14. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin, 1983, 43, pp. 69-78. URL: [https://www.ltr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Holmes\\_1983.pdf](https://www.ltr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Holmes_1983.pdf).
15. Hoy A., Sepp M., Matschullat J. Large-scale atmospheric circulation forms and their impact on air temperature in Europe and northern Asia // Theoretical and applied climatology, 2013, Vol 113, pp. 643-658. DOI: 10.1007/s00704-012-0813-9.
16. IPCC AR6 WGI. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата обращения: 10.10.2023).
17. Jiang Y. et al. Radial growth response of *Larix gmelinii* to climate along a latitudinal gradient in the Greater Khingan Mountains, Northeastern China // Forests, 2016, Vol. 7, Iss. 12, pp. 295. DOI: 10.3390/f7120295.
18. Karl T. R., Trenberth K. E. Modern global climate change // Science, 2003, Vol. 302, Iss. 5651, pp. 1719-1723. DOI: 10.1126/science.109022.
19. Köcher P. [et al.] Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies // Annals of Forest Science, 2009, Vol. 66, Iss. 1, pp. 1. DOI: 10.1051/forest/2008076.
20. Larsson L. Å. CDendro & CooRecorder software dendrochronology measurements and dating, version 9.3.1 // 2019. URL: <http://www.cybis.se/forfun/dendro>.
21. Lavigne M. B., Ryan M. G. Growth and maintenance respiration rates of aspen, black spruce and jack pine stems at northern and southern BOREAS sites // Tree Physiology, 1997, Vol. 17, Iss. 8-9, pp. 543-551. DOI: 10.1093/treephys/17.8-9.543.
22. Lyu S. [et al.] Different responses of Korean pine (*Pinus koraiensis*) and Mongolia oak (*Quercus mongolica*) growth to recent climate warming in northeast China // Dendrochronologia, 2017, Vol. 45, pp. 113-122. DOI: 10.1016/j.dendro.2017.08.002.
23. Pederson N. [et al.] The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern range margin tree species // Dendrochronologia, 2004, Vol. 22, Iss. 1, pp. 7-29. DOI: 10.1016/j.dendro.2004.09.005.
24. Peguero-Pina J. J. et al. Living in drylands: Functional adaptations of trees and shrubs to cope with high temperatures and water scarcity // Forests, 2020, Vol. 11, Iss. 10, P.1028. DOI: 10.3390/f11101028.
25. Peñuelas J., Canadell J. G., Ogaya R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth // Global Ecology and Biogeography, 2011, Vol. 20, Iss. 4, pp. 597-608. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00608.x.
26. Perez-Garcia J. [et al.] Impacts of climate change on the global forest sector // Climatic change, 2002, Vol. 54, pp. 439-461. DOI: 10.1023/A:1016124517309.
27. Petr M. [et al.] Inconsistent recognition of uncertainty in studies of climate change impacts on forests // Environmental Research Letters, 2019, Vol. 14, Iss. 11. P. 113003. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4670.
28. Rinn F. TSAP-Win professional // Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications, 2007, P. 20. URL: <http://www.rinntech.de/index-28703.html>.
29. Soja A. J., Tchebakova N. M., French N. H. F. [et al.] Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations // Global and Planetary Change, 2007, Vol. 56, Iss. 34, pp. 274-296. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.028.

30. Tardif J., Brisson J., Bergeron Y. Dendroclimatic analysis of *Acer saccharum*, *Fagus grandifolia*, and *Tsuga canadensis* from an old-growth forest, southwestern Quebec // Canadian Journal of Forest Research, 2001, Vol. 31, Iss. 9, pp. 1491-1501. DOI: 10.1139/x01-088.
31. Thomas P., Farjon A. *Pinus koraiensis*. The IUCN Red List of Threatened Species // UK, 2013, Vol. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN>.
32. Ukhvatkina O. [et al.] Tree-ring-based spring precipitation reconstruction in the Sikhote-Alin' Mountain range // Climate of the Past, 2021, Vol. 17, Iss. 2, pp. 951-967. DOI: 10.5194/cp-17-951-2021.
33. Venäläinen A. [et al.] Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: A literature review // Global change biology, 2020, Vol. 26, Iss. 8, pp. 4178-4196. DOI: 10.1111/gcb.15183.
34. Wang H. [et al.] The impacts of climate change on the radial growth of *Pinus koraiensis* along elevations of Changbai Mountain in northeastern China // Forest Ecology and Management, 2013, Vol. 289, pp. 333-340. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.10.023.
35. Wang X. [et al.] Recent rising temperatures drive younger and southern Korean pine growth decline // Science of the Total Environment, 2019, Vol. 649, pp. 1105-1116. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.393.
36. Wang X. [et al.] Temperature signals in tree-ring width and divergent growth of Korean pine response to recent climate warming in northeast Asia // Trees, 2017, Vol. 31, pp. 415-427. DOI: 10.1007/s00468-015-1341-x.
37. Way D. A., Sage R. F. Elevated growth temperatures reduce the carbon gain of black spruce [*Picea mariana* (Mill.) BSP] // Global Change Biology, 2008, Vol. 14, Iss. 3, pp. 624-636. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01513.x.
38. Wu C. Y., Raven P. H., Hong D. Y. Flora of China (Cycadaceae through Fagaceae) // Science Press, Beijing & St. Louis, 1999, Vol. 4. URL: <http://flora.huh.harvard.edu/china/mss/volume04/index.htm>.
39. Yasmeen S. [et al.] Contrasting climate-growth relationship between *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* along a latitudinal gradient in Daxing'an Mountains, China // Dendrochronologia, 2019, Vol. 58, pp. 125645. DOI: 10.1016/j.dendro.2019.125645.
40. Zang C., Biondi F., Zang M. C. Package 'treeclim', 2022. URL: <https://cran.rstudio.org/web/packages/treeclim/treeclim.pdf>.
41. Zhang P., Liu B. Effect of climate change on *Larix gmelinii* growth in different latitudes // J. Northeast For. Univ, 2015, Vol. 43, pp. 10-13. URL: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTototal-DBLY201503003.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTototal-DBLY201503003.htm).
42. Zhu H. F. [et al.] Tree ring-based February–April temperature reconstruction for Changbai Mountain in Northeast China and its implication for East Asian winter monsoon // Climate of the Past, 2009, Vol. 5, Iss. 4, pp. 661-666. DOI: 10.5194/cp-5-661-2009.
43. Zhu L. [et al.] Rapid warming induces the contrasting growth of Yezo spruce (*Picea jezoensis* var. *microsperma*) at two elevation gradient sites of northeast China // Dendrochronologia, 2018, Vol. 50, pp. 52-63. DOI: 10.1016/j.dendro.2018.05.002.
44. Dendrochronologicheskaya informatsiya v lesovodstvennykh issledovaniyakh [Dendrochronological information in silvicultural research] / M.S. Aleksandrova, V.V. Korovin, S.A. Korotkov, A.M. Krylov, V.A. Lipatkin, D.E. Rumyantsev i dr. // Moskovskiy gosudarstvennyy universitet lesa [Moscow State Forest University]. 2007. 138 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19510954>.
45. Osobennosti temperaturnogo rezhima u poverhnosti Zemnogo shara v 2018 go-du [Features of the temperature regime near the surface of the globe in 2018] / G.V. Gruza, E.YA. Ran'kova, I.A. Korneva i dr. // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and applied climatology]. 2019. Vol. 1. pp. 97-127. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38585118>.
46. Man'ko, YU. I., Gladkova, G. A. Massovoe usyhanie pihtovo-elovykh lesov na rossijskom Dal'nem Vostoke: osnovnye itogi izucheniya [Massive drying out of fir-spruce forests in the Russian Far East: main results of the study]. Komarovskie chteniya [Komarov readings]. 2003. Iss. 49. pp. 131-171. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28286431>.

47. Pavlov, I. N. Bioticheskie i abioticheskie faktory usyhaniya hvoynyh lesov Sibiri i Dal'-nego Vostoka [Biotic and abiotic factors of drying out of coniferous forests of Siberia and the Far East]. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* [Siberian Ecological Journal]. 2015. Vol. 22. Iss. 4. pp. 537-554. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/0bf/0bf4ab0bfd414515f541bdc0e632251.pdf>.

48. Romyancev, D. E., Kuhta, A. E., Puchinskaya, D. V. Klimaticheskij signal zasuh v hronologii eli iz kislichnogo tipa lesa Central'no-lesnogo zapovednika [Climatic signal of droughts in the chronology of spruce from the sorrel forest type of the Central Forest Reserve]. *Lesnoj vestnik* [Forestry bulletin]. 2016. Vol. 20. Iss. 2. pp. 36-43. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskij-signal-zasuh-v-hronologii-eli-iz-kislichnogo-tipa-lesa-tsentralno-lesnogo-zapovednika>.

49. Rusakova, YU. A. OON: v povestke dnya –problema izmeneniya klimata [UN: climate change is on the agenda]. *Vestnik MGIMO-Universiteta* [Bulletin of MGIMO University]. 2021. Vol. 4. Iss. 13. pp. 286-294. URL: <https://www.vestnik.mgimo.ru/jour/article/download/2919/2374>.

50. Solov'ev, K. P. Kedrovo-shirokolistvennye lesa Dal'nego Vostoka i hozyajstvo v nih [Siberian pine-broadleaf forests of the Far East and farming in them] / K.P. Solov'ev. Habarovsk:Kn. Izd-vo [Khabarovsk: Book Publishing house]. 1958. 325 p.

51. Shiyatov, S. G. i dr. Metody dendrohronologii [Methods of dendrochronology] / S.G. SHiyatov, E.A. Vaganov, A.V. Kirryanov i dr.// KrasGAU, Uchebno-metodicheskoe posobie [Educational and methodological manual]. 2000. 80 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18801379>.

### Сведения об авторах

✉ *Рублева Марина Евгеньевна* – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», пр. Свободный, 79, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6609-4180>, [marishka\\_6500@mail.ru](mailto:marishka_6500@mail.ru).

*Возмищева Анна Степановна* – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории комплексных исследований динамики лесов Евразии, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», пр. Свободный, 79, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1597-6685>, [vozmishcheva@inbox.ru](mailto:vozmishcheva@inbox.ru).

*Бондарчук Светлана Николаевна* – старший научный сотрудник ФГБУ «Сихотэ-Алинский государственный природный биосферный заповедник имени К.Г. Абрамова», ул. Партизанская, 44, п. Терней, Российская Федерация, 92150, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3641-5203>, [Bonsal@mail.ru](mailto:Bonsal@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Marina E. Rubleva* – Postgraduate Student (Biology), Junior Researcher, Laboratory for Complex Studies of Forest Dynamics of Eurasia, Siberian Federal University, Svobodny pr., 79, Krasnoyarsk city, Russian Federation, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6609-4180>, [marishka\\_6500@mail.ru](mailto:marishka_6500@mail.ru).

*Anna S. Vozmishcheva* – Cand. Sci. (Biology), Researcher, Laboratory for Complex Studies of Forest Dynamics of Eurasia, Siberian Federal University, Svobodny pr., 79, Krasnoyarsk city, Russian Federation, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1597-6685>, [vozmishcheva@inbox.ru](mailto:vozmishcheva@inbox.ru).

*Svetlana N. Bondarchuk* – Senior Researcher, Sikhote-Alin State Natural Biosphere Reserve named after K.G. Abramova, st. Partizanskaya, 44, Terney settlement, Russian Federation, 92150, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3641-5203>, [Bonsal@mail.ru](mailto:Bonsal@mail.ru)

✉ – Для контактов | Corresponding author