

Научная статья  
УДК 630.11:630.561.24  
EDN KGJGUR  
DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.03

## Особенности радиального роста сосны сибирской в условиях меняющегося климата горного хребта Хамар-Дабан\*

Юлия Сергеевна Ачиколова<sup>1</sup>

Александр Александрович Агеев<sup>2</sup>  
кандидат сельскохозяйственных наук

Сергей Алексеевич Астапенко<sup>3</sup>  
кандидат биологических наук

Анна Николаевна Головина<sup>4</sup>

**Аннотация.** Представлено исследование реакции радиального роста сосны сибирской *Pinus sibirica* Du Tour на изменение климатических условий горного хребта Хамар-Дабан, расположенного к юго-западу от озера Байкал, с применением современных методов дендрохронологии. Полевые работы проведены летом 2020 г. Заложено четыре маршрутных хода, на которых выполнено детальное описание насаждений, включая оценку санитарного состояния. По измерениям ширины годовых колец (ШГК) кернов сосны сибирской построены хронологии, на основе которых получены индексы годового прироста. Проанализированы климатические данные метеостанции Хамар-Дабан и г. Бабушкин, а также летописи природы Байкальского заповедника. Определена зависимость ширины годового кольца от климатических показателей. В связи с отсутствием одного выраженного лимитирующего фактора, климатический сигнал проявляется слабо. Тем не менее присутствует отклик и корреляция ШГК с температурой июня и осадками мая и августа–сентября. Выявлены аномалии структуры годовых колец в виде двойного прироста, участившиеся в последние десятилетия, которые свидетельствуют об увеличении продолжительности вегетационного сезона из-за роста осенних положительных температур.

**Ключевые слова:** сосна сибирская, радиальный рост, ширина годового кольца, аномалии структуры годового кольца, изменение климата, Хамар-Дабан.

**Для цитирования:** Ачиколова Ю.С., Агеев А.А., Астапенко С.А., Головина А.Н. Особенности радиального роста сосны сибирской в условиях меняющегося климата горного хребта Хамар-Дабан. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2023. № 3. С. 37–54. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.03. <https://elibrary.ru/kgjgur>.

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ведущий инженер отдела лесоводства и лесостроительства (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), [ripintook@yandex.ru](mailto:ripintook@yandex.ru)

<sup>2</sup> Центр лесной пирологии, развития технологий охраны лесных экосистем, защиты и воспроизводства лесов, филиал Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, заведующий лабораторией защиты и воспроизводства лесов, (Красноярск, Российская Федерация), [ageevaa@firescience.ru](mailto:ageevaa@firescience.ru)

<sup>3</sup> Центр лесной пирологии, развития технологий охраны лесных экосистем, защиты и воспроизводства лесов, филиал Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, старший научный сотрудник лаборатории защиты и воспроизводства лесов (Красноярск, Российская Федерация), [astapenkosa@firescience.ru](mailto:astapenkosa@firescience.ru)

<sup>4</sup> Центр лесной пирологии, развития технологий охраны лесных экосистем, защиты и воспроизводства лесов, филиал Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, инженер-исследователь лаборатории защиты и воспроизводства лесов (Красноярск, Российская Федерация), [golovinaan@firescience.ru](mailto:golovinaan@firescience.ru)

\* Публикуется в авторской редакции.

Original article

EDN KGJGUR

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.03

## Siberian Pine's Radial Growth Features in a Changing Climate of the Khamar-Daban Mountain Range

**Iuliia S. Achikolova**<sup>1</sup>**Aleksandr A. Ageev**<sup>2</sup>*Candidate of Agricultural Sciences***Sergei A. Astapenko**<sup>3</sup>*Candidate of Biological Sciences***Anna N. Golovina**<sup>4</sup>

**Abstract.** The study investigates reaction of Siberian pine *Pinus sibirica* Du Tour radial growth to changing climatic conditions of the Khamar-Daban mountain range (southwest of Lake Baikal) using dendrochronological methods. Field work was carried out in the summer of 2020. Four sampling plots in the form of 50 m length route were laid. Forest stands were described in details on every plot. Time series of Siberian pine tree-ring width (TRW) were built and after statistic processing annual growth indices were obtained. For climatic analysis data of Khamar-Daban and Babushkin weather stations as well as the Baikal Reserve nature chronicles were examined. The tree-ring width dependence on climatic indicators was determined. In the study area there are no one highly expressed limiting factor, thus the climatic signal is weak. Nevertheless, TRW responds and correlates with the temperature of June and precipitation of May and August–September. Anomalies in the annual rings structure in the form of a double ring, which have become more frequent in recent decades, are revealed. This double growth indicates that the growing season duration enlarges due to increasing autumn temperatures.

**Key words:** Siberian pine, radial growth, tree-ring width, annual rings structure anomalies, climate change, Khamar-Daban.

**For citation:** Achikolova I., Ageev A., Astapenko S., Golovina A. Siberian Pine's Radial Growth Features in a Changing Climate of the Khamar-Daban Mountain Range // *Forestry information*. 2023. № 3. P. 37–54. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.03. <https://elibrary.ru/kgjgur>.

<sup>1</sup> Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Lead Engineer of Department for Silviculture and Forest Management (Pushkino, Moscow region, Russian Federation), [pipintook@yandex.ru](mailto:pipintook@yandex.ru)

<sup>2</sup> The Center of the Forest Pyrology, Development of Forest Ecosystem Conservation, Forest Protection and Regeneration Technologies, Branch of Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Head of Laboratory for Forest Protection and Reproduction (Krasnoyarsk, Russian Federation), [ageevaa@firescience.ru](mailto:ageevaa@firescience.ru)

<sup>3</sup> The Center of the Forest Pyrology, Development of Forest Ecosystem Conservation, Forest Protection and Regeneration Technologies, Branch of Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Senior Researcher of Laboratory for Forest Protection and Reproduction (Krasnoyarsk, Russian Federation), [astapenkosa@firescience.ru](mailto:astapenkosa@firescience.ru)

<sup>4</sup> The Center of the Forest Pyrology, Development of Forest Ecosystem Conservation, Forest Protection and Regeneration Technologies, Branch of Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Research Engineer of Laboratory for Forest Protection and Reproduction (Krasnoyarsk, Russian Federation), [golovinaan@firescience.ru](mailto:golovinaan@firescience.ru)

## Введение

Горно-таежные леса Байкальского региона – одна из важнейших составляющих сохранения Байкала как природного объекта универсального значения. В последние десятилетия в Прибайкалье, в частности на территории горного массива Хамар-Дабан, наблюдается постепенное ухудшение санитарного состояния насаждений сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica* Du Tour [1–3], которое выражается в усыхании древостоя. Усыхание хвойных лесов в бореальной зоне происходит во многих частях мира из-за участившихся засух в летний период [4–8]. Засухи – это повторяющееся естественное нарушение, их можно рассматривать как экстремальные явления в лесных экосистемах. Более частые засухи в условиях глобальных изменений вызывают значительные повреждения насаждений, что может привести к серьезным экологическим последствиям [9]. Как правило, гибель дерева связана с продолжительным, в течение нескольких лет, дефицитом увлажнения в сезон его активного роста [10]. Устойчивость к засухам варьирует в зависимости от вида и размера дерева [9]. Таким образом, вызванная засухой гибель деревьев может привести к изменению состава насаждений, снижению видового разнообразия и, как следствие, – функциональной устойчивости лесов.

Наиболее выражено воздействие современного глобального потепления проявляется в высокоширотных и высокогорных экосистемах [11]. В горах на небольшой площади можно наблюдать широкий спектр условий для жизни древесных растений [12]. Из-за ограниченных площадей и значительных градиентов внешних условий горные экосистемы более чувствительны к климатическим изменениям, чем равнинные, тем самым они могут служить индикаторами экологических последствий изменения климатических условий.

Деревья, благодаря особой структуре клеток, тканей и органов с их пространственными отношениями и физиологическими состояниями, несут большой объем информации о своей прошлой жизни и окружающей среде [13].

Целью работы является исследование реакции радиального роста сосны сибирской на изменение климатических условий горного хребта Хамар-Дабан с применением методов дендрохронологии. Для достижения цели решались следующие задачи:

- ✓ построение древесно-кольцевых хронологий (ДКХ) по кернам и их абсолютная датировка;
- ✓ исследование связи радиального прироста сосны сибирской и климатических характеристик района;
- ✓ выявление аномалий структуры годового кольца в виде двойного прироста, определение точных дат их возникновения.

Современное изменение климата оказывает значительное влияние на леса, которые в силу ограниченной способности к адаптации теряют устойчивость [14]. Изучение реакции радиального прироста на изменение локальных климатических условий позволит проводить мониторинг состояния лесов. На сегодняшний день исследования насаждений сосны кедровой в горах Прибайкалья с использованием дендрохронологических методов практически отсутствуют.

## Объекты и методы исследования

Горный хребет Хамар-Дабан простирается на 350 км вдоль юго-западной части озера Байкал, его ширина составляет 40–80 км. Высота хребта – 1 500–1 800 м, а самая высокая точка, гора Хан-Ула, достигает 2 371 м. Ближе к Байкалу располагаются горные цепи чисто альпийского типа с гребнями и остроконечными пиками. В глубине горной системы преобладают пологие округлые гольцы, которые постепенно уменьшаются в высотном направлении на юг и юго-восток [15].

Климат на территории Хамар-Дабана резко континентальный, для него характерны большие амплитуды температур в течение суток и года. Большая водная масса озера Байкал смягчает климат побережья по сравнению с остальной территорией. Зима продолжительная, холодная, малоснежная, длится с ноября до середины

апреля. В прибрежной зоне Байкала средняя температура воздуха в январе –  $-17,7^{\circ}\text{C}$ , средняя июльская температура –  $14,1^{\circ}\text{C}$ , среднегодовая составляет  $-0,7^{\circ}\text{C}$ . Годовая амплитуда температуры воздуха –  $31,8^{\circ}\text{C}$ . Вегетационный период продолжается 120–130 сут [16].

Северо-западная часть хребта имеет широкий фронт с основным потоком влажных воздушных масс в Прибайкалье – здесь выпадает наибольшее количество осадков в регионе: 1 500–1 800 мм у верхней границы леса. В зимний период формируется мощный снежный покров, на верхней границе леса достигая 2-метрового слоя, а у подножья хребта в прибрежной зоне – в среднем около 1 м. Зимой в этой части хребта почвы не промерзают. Уникальный микроклимат, сформировавшийся на северном макросклоне, способствует образованию темнохвойной кедрово-пихтовой тайги со значительной долей участия растений-реликтов. На северо-западных склонах хребта хорошо выражены 3 растительных пояса: лесной темнохвойный, субальпийский – кустарниково-разнотравный, и альпийский [16].

В лесном поясе горной системы доминирует темнохвойная тайга. На верхней границе преобладают разреженные пихтовые насаждения IV–V классов бонитета полнотой 0,4–0,5. Их высота чаще не превышает 15–16 м. С понижением к Байкалу доля участия сосны сибирской (кедра сибирского) увеличивается.

В среднегорьях и низкогорьях широко распространены пихтово-кедровые леса. В составе древостоев преобладает кедр сибирский, оставшаяся доля насаждений приходится на пихту, ель, лиственницу и единично – сосну обыкновенную. Полнота насаждений преимущественно варьирует от 0,5 до 0,7–0,8, класс бонитета – II–III. Средняя высота кедра сибирского 16–18 м. Подлесок средней густоты с преобладанием в составе рябины и жимолости. В верхнем поясе основной подлесочной породой является можжевельник. Подрост неравномерный, чаще формируется в виде густых куртин, образующихся в «окнах» и по прогалинам, с преобладанием в составе пихты и кедра сибирского. Основные

растения-индикаторы в живом напочвенном покрове: черника, брусника, зеленые мхи, осока, бадан, папоротник, майник [16].

Объектом исследования являются деревья сосны сибирской, произрастающие в усыхающих насаждениях северного макросклона горного хребта Хамар-Дабан (рис. 1). Обследование насаждений проводилось в июле–августе 2020 г., было заложено четыре маршрутных хода (МХ), расположенных перпендикулярно высотному поясу темнохвойной тайги. По направлению маршрутного хода в ключевых точках заложено 12 учетных площадок в виде узких лент шириной 4 м и площадью 200–400 м<sup>2</sup>, на которых методом глазомерно-инструментальной таксации проведена лесоводственно-таксационная оценка насаждений, а также сбор образцов древесины. Описание элементов насаждения выполнено с распределением деревьев по категориям санитарного состояния в соответствии со шкалой категорий состояния деревьев, приведенной в приложении 1 Правил санитарной безопасности в лесах от 20.05.2017 г. [17]. Расположение маршрутных ходов и метеостанций представлено на рис. 2.

В последние десятилетия в Байкальском регионе отмечаются процессы усыхания темнохвойных лесов, основной причиной которых исследователи называют обострение хронического течения бактериальных болезней хвойных с связи с происходящими изменениями климатического баланса [2, 3, 18–21].

Динамику и площадь поврежденных насаждений на данный момент можно оценить только на основе существующей ведомственной информации, формируемой ФБУ «Рослесозащита» и ее региональными филиалами. Так, на основе дешифрирования материалов ДЗЗ, относящихся к южной части Прибайкалья, специалистами Иркутского центра защиты леса выявлено, что с 2014 г. происходит ежегодный прирост площади поврежденных темнохвойных насаждений, приуроченных к району обследования:

Год	2014	2015	2016	2017	2018
Площадь, га	7 090	64 718	3 475	3 024	14 675



а



б

**Рис. 1. Состояние насаждений на северном макросклоне Хамар-Дабана:**  
а – чистый участок насаждений кедра сибирского, санитарное состояние которого оценивается как погибшее (МХ 1); б – смешанное темнохвойное насаждение, в котором отмечена массовая гибель кедра сибирского на протяжении всего маршрутного хода (МХ 4)



**Рис. 2. Расположение маршрутных ходов и метеостанций**

Суммарная площадь поврежденных насаждений, по данным ДЗЗ, превышает 100 000 га.

Высокий прирост площади в 2015 г. обусловлен крупными вспышками массового размножения насекомых-вредителей.

Стоит отметить, что не вся территория поврежденных насаждений обследована наземным способом, следовательно, приведенные данные о площадях поврежденных темнохвойных насаждений могут не в полной мере отражать действительность. По результатам ежегодного космомониторинга, осуществляемого Центром защиты леса Иркутской области, основные очаги усыхания кедровых насаждений сформировались в северо-западной части хребта на территории Слюдянского лесничества Иркутской обл. Именно в этой части хребта были сосредоточены основные усилия по обследованию кедрово-пихтовых насаждений. Помимо этого, проведено обследование ряда лесных участков на сопредельных территориях, также относящихся к центральной экологической зоне, в Бабушкинском лесничестве Республики Бурятия.

Для проведения дендрохронологического анализа с деревьев 1–3 категории санитарного состояния на высоте 1,3 м от поверхности земли были взяты керны диаметром 5 мм по двум радиусам с каждого дерева. При выборе направлений взятия кернов стороны света не учитывались, так как этот фактор не влияет на получаемые в результате данные [22]. Для удобства транспортировки и сохранения целостности керны помещались в заранее подготовленные бумажные тубусы, на которых отмечался код участка, номер и вид дерева, категория состояния. В целом на территории хребта Хамар-Дабан было отобрано около 200 кернов с деревьев кедра, пихты и ели.

В лабораторных условиях керны подготовлены к измерению согласно стандартной методике [11, 23]. Измерение ширины годичных колец

(ШГК) проводилось на полуавтоматической установке Тайга-V со специальным программным обеспечением [24]. Проверка точности датировки выполнена программой COFESHA пакета DPL [25], после чего были внесены корректировки, удалены выбивающиеся серии. Чтобы выявить климатический сигнал и значительно снизить влияние других факторов, была выполнена стандартизация в среде программирования R<sup>1</sup> [26]. Климатический анализ проведен с использованием данных метеостанции г. Бабушкин<sup>2</sup> и летописей природы Байкальского заповедника<sup>3</sup>. База данных метеостанций находится в открытом доступе.

## Результаты и обсуждение

Район исследования характеризуется относительно благоприятными климатическими условиями и не имеет выраженного лимитирующего фактора. В прибрежной зоне Байкала в год выпадает около 1 000 мм осадков, а глубина снежного покрова обычно не превышает 0,8 м. Средняя температура воздуха в январе – -15,9 °С, в июле – +15,4 °С. Снежный покров на побережье лежит в среднем 180 сут<sup>4</sup>.

Анализ многолетних трендов среднемесячных температур воздуха и сумм осадков весенне-летнего периода (рис. 3) показывает общую тенденцию к росту температуры. Заметно значительное повышение температуры июня и июля с 1980-х гг., сопровождаемое небольшим снижением количества осадков. Сумма осадков мая существенно увеличилась за последние 40 лет.

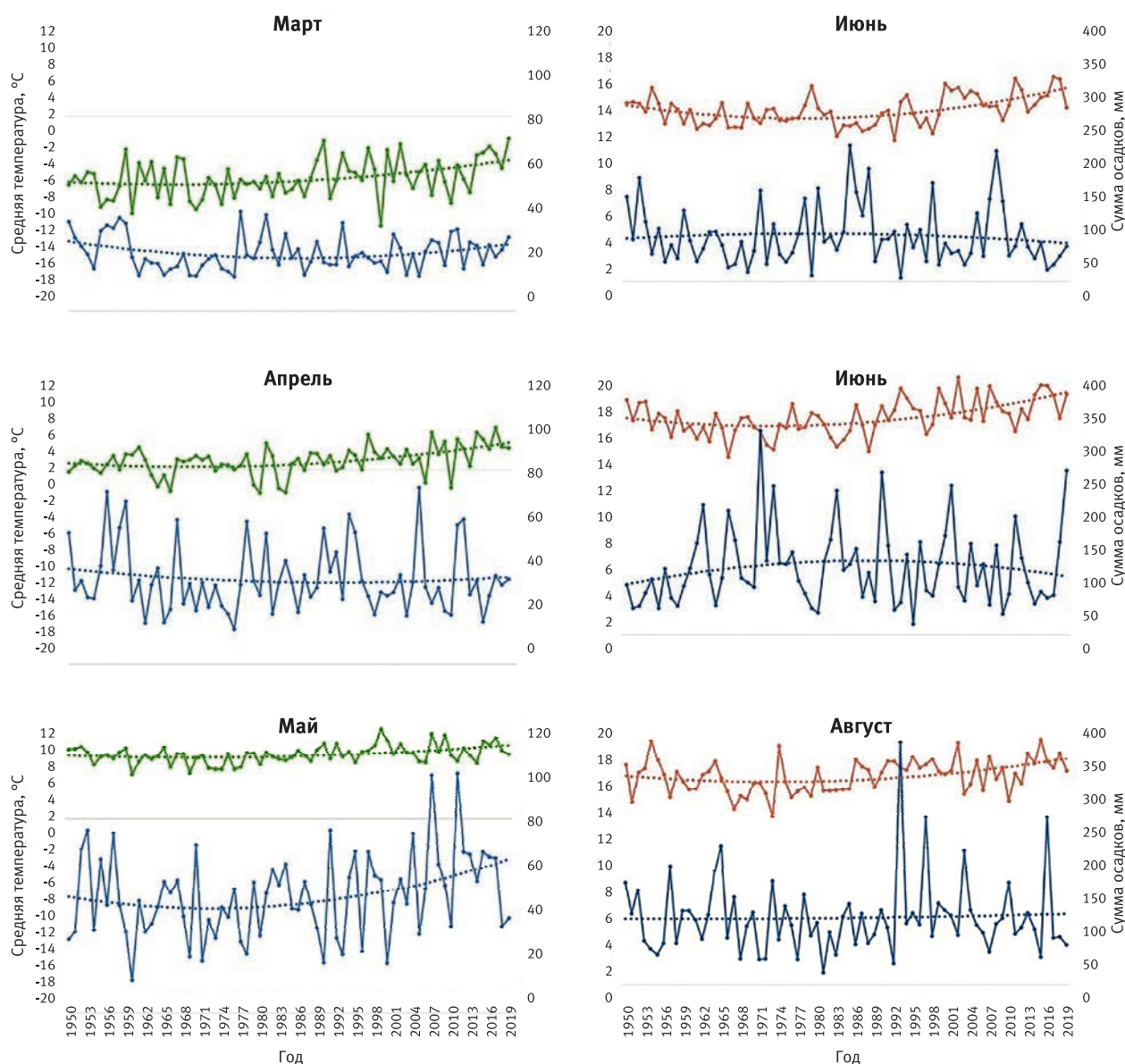
Тенденция изменения климатических показателей в летний период продолжается в сентябре: он становится суше и теплее. Отмечено также повышение средних температур зимы, особенно ярко выраженное для самых холодных месяцев – января и февраля (рис. 4).

<sup>1</sup> The Comprehensive R Archive Network. – URL: <https://cran.r-project.org/>.

<sup>2</sup> Погода в Бабушкине – ПП5. – URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 25.03.2021).

<sup>3</sup> Летопись природы. – URL: <https://baikalzapovednik.ru/naturechronicle>.

<sup>4</sup> Климат Байкальского заповедника. – URL: <https://baikalzapovednik.ru/climate> (дата обращения: 07.04.2021)



**Рис. 3. МНОГОЛЕТНИЕ ТРЕНДЫ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР И СУММ ОСАДКОВ ВЕСЕННЕ-ЛЕТНЕГО ПЕРИОДА (ЗЕЛЕНЫЙ И ОРАНЖЕВЫЙ ЦВЕТ – ТЕМПЕРАТУРА, СИНИЙ – ОСАДКИ)**

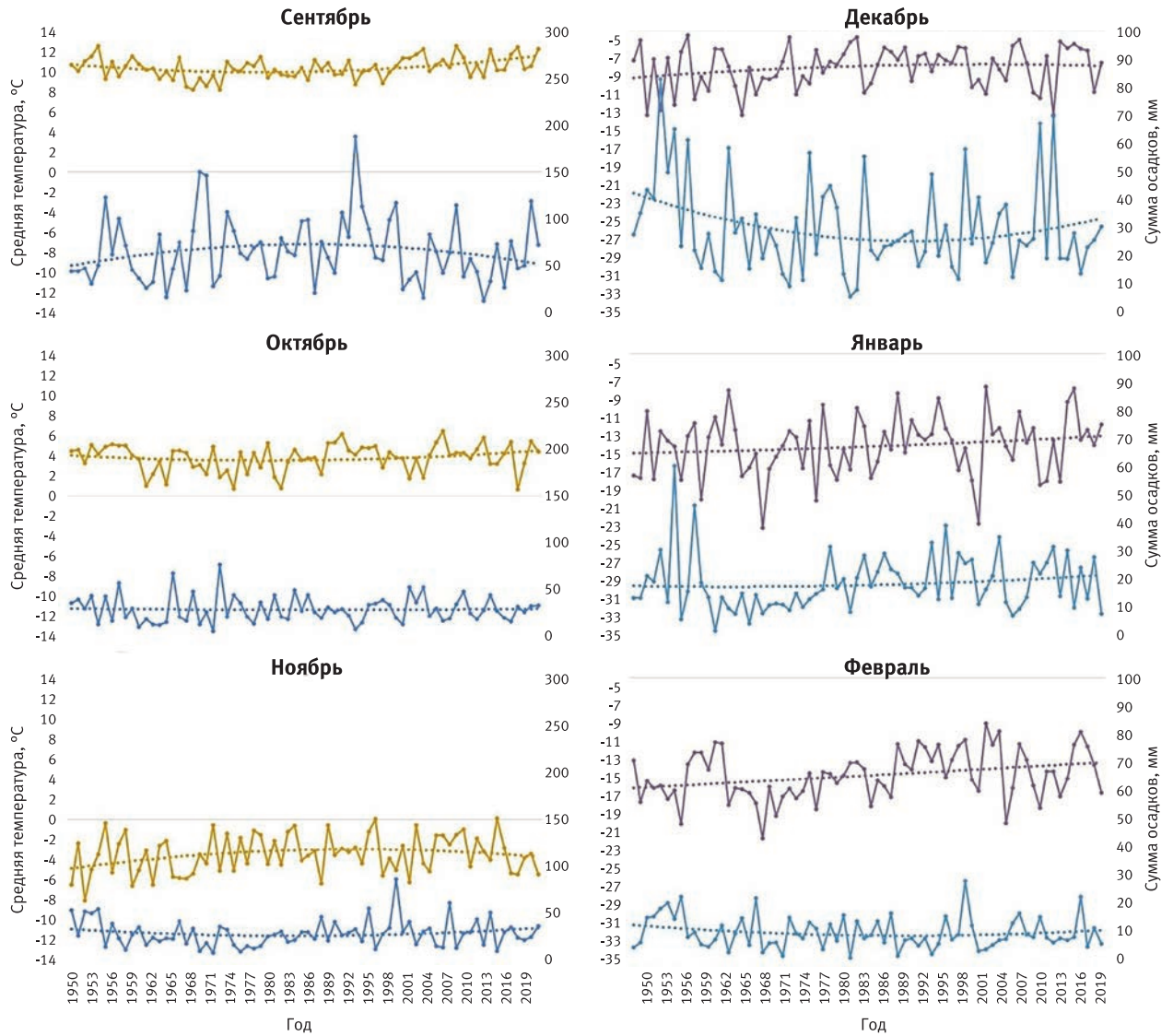
Изменение климатических показателей определяет динамику роста древесных растений и отражается в том числе и в величине годичного радиального прироста. Однако годичные кольца деревьев содержат также различные неклиматические сигналы, значение которых для прироста может быть очень существенным.

Так, полученные хронологии ширины годичного кольца сосны сибирской имеют высокий коэффициент автокорреляции (среднее значение 0,96), что говорит о значимом влиянии прироста предыдущего года на прирост текущего года. Для

выявления климатического сигнала в сериях проведена стандартизация в программной среде R, получены индексы радиального прироста.

Критерием оценки надежности серии является выраженный популяционный сигнал – expressed population signal (EPS). При значениях  $EPS \geq 0,85$  хронология считается достаточно представительной [23].

Согласованность изменений параметров годичного кольца у разных деревьев также характеризует средний коэффициент межсерийной корреляции  $R_{bar}$ . Чем выше этот параметр, тем



**Рис. 4. Многолетние тренды среднemesячных температур и сумм осадков осени и зимы (желтый и фиолетовый цвет – температура, синий – осадки)**

сильнее и более согласованно деревья реагируют на изменения внешних условий.

Анализ климатического отклика и связи индексов прироста с климатическими показателями был выполнен в программе DendroClim 2002 [27] с использованием бутстрап функции скользящей средней с окном 32–52 года, в зависимости от длины серий. В качестве климатических показателей использовались сумма осадков, средняя температура воздуха по месяцам за текущий год и гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК). Гидротермический коэффициент характеризует уровень влагообеспеченности территории и рассчитывается по формуле:

$$K = R \cdot 10 / \Sigma t,$$

где:

R – сумма осадков за период с температурой выше 10 °C, мм;

$\Sigma t$  – сумма температур за тот же период, °C.

### Маршрутный ход 1

Величина выраженного популяционного сигнала EPS ДКХ на маршрутном ходе 1 равна 0,89, что говорит о достаточном для дендроклиматического анализа количестве образцов. Рассчитанный средний коэффициент межсерийной



корреляции Rbar для маршрутного хода 1 равен 0,30. Индексированная хронология ширины годовичных колец сосны сибирской представлена на рис. 5, климатический анализ – на рис. 6.

Слева (рис. 6а) показан бутстрап анализ связи ДКХ с суммой осадков, средней температурой и ГТК, справа (рис. 6б) – бутстрап анализ скользящих интервалов связи ДКХ с суммой осадков и средними температурами по месяцам с окном 48 лет. Цветом обозначена теснота связи от отрицательной (синяя палитра) до положительной (красная палитра), зеленый цвет означает отсутствие статистически достоверной связи.

Величина годовичного прироста положительно реагирует на температуру сентября предыдущего года (коэффициент корреляции равен 0,28) и отрицательно – на сумму осадков августа текущего года (коэффициент корреляции равен -0,28). В определенные годы годовичный прирост положительно реагирует на увеличение осадков марта, эта связь довольно устойчива, коэффициент корреляции равен 0,4.

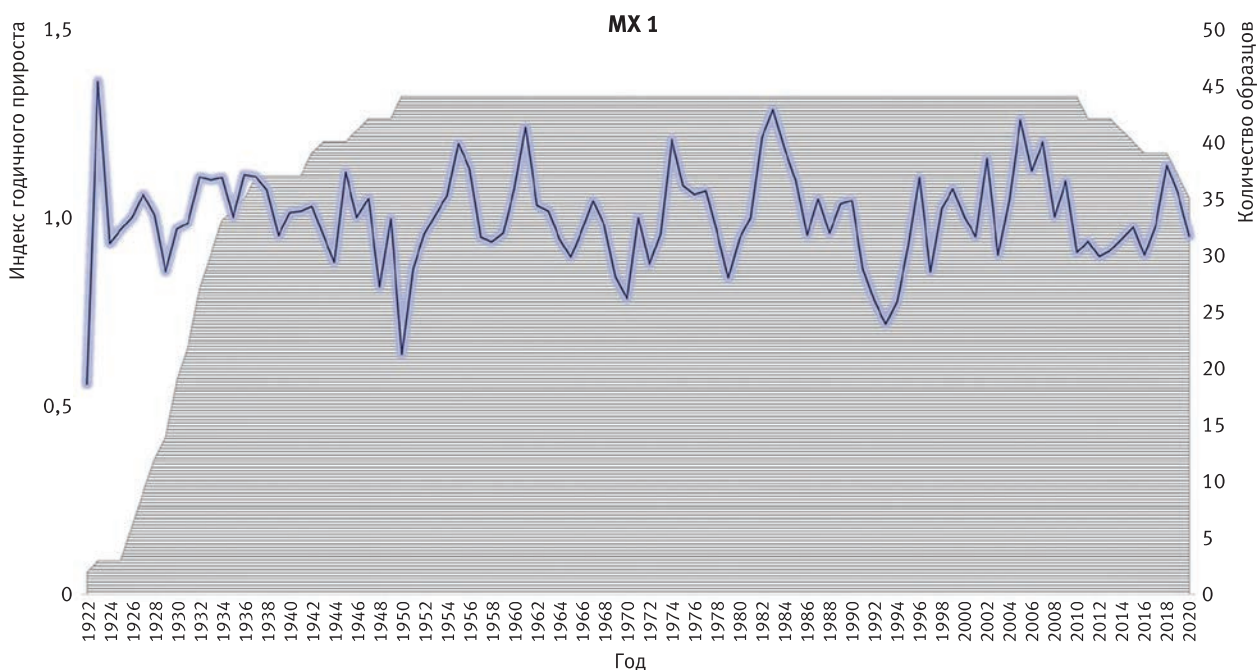


Рис. 5. Индексированная ДКХ сосны сибирской на маршрутном ходе 1

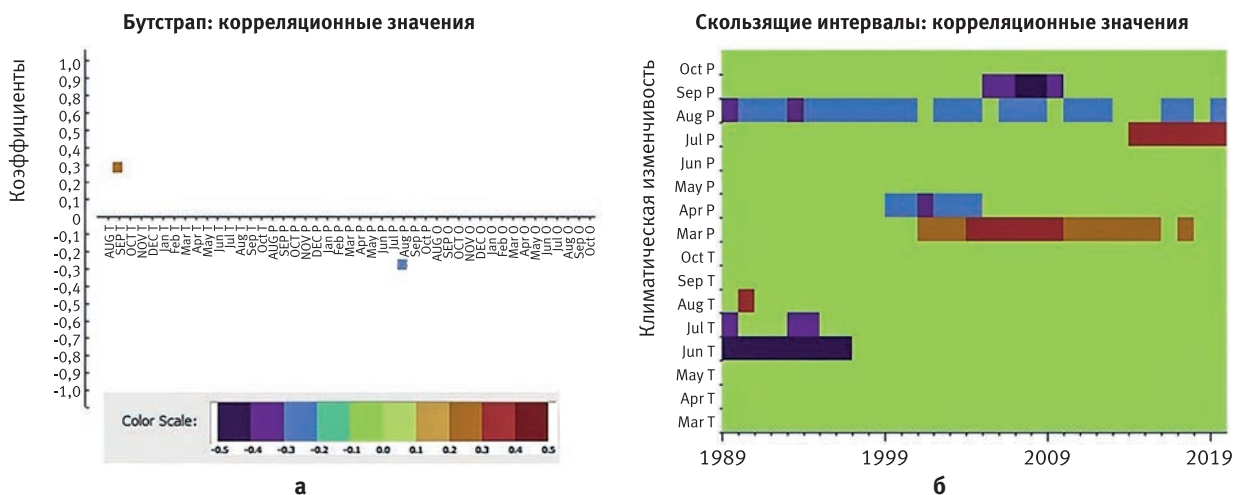


Рис. 6. Климатический анализ ДКХ сосны сибирской на маршрутном ходе 1:  
а – БУТСТРАП, б – СКОльзяЩИЕ ИНТЕРВАЛЫ

В 1980–1990-е гг. отмечалось понижение температуры и увеличение суммы осадков июня, которые отрицательно коррелируют с приростом. Повышение количества осадков марта в последние 20 лет положительно сказывается на радиальном росте. В этот период увеличилась и средняя температура, в связи с этим можно предположить, что совместное действие этих факторов способствует ранней активации ростовых процессов и дерево накапливает достаточно энергии для инициации радиального роста в мае–июне.

### Маршрутный ход 2

Величина выраженного популяционного сигнала EPS ДКХ на маршрутном ходе 2 равна 0,85, средний коэффициент межсерийной корреляции Rbar равен 0,28. Индексированная хронология ширины годичных колец сосны сибирской представлена на рис. 7, климатический анализ – на рис. 8.

На данном участке определен климатический отклик на сумму осадков января и августа текущего года. Прямая связь прироста с количеством

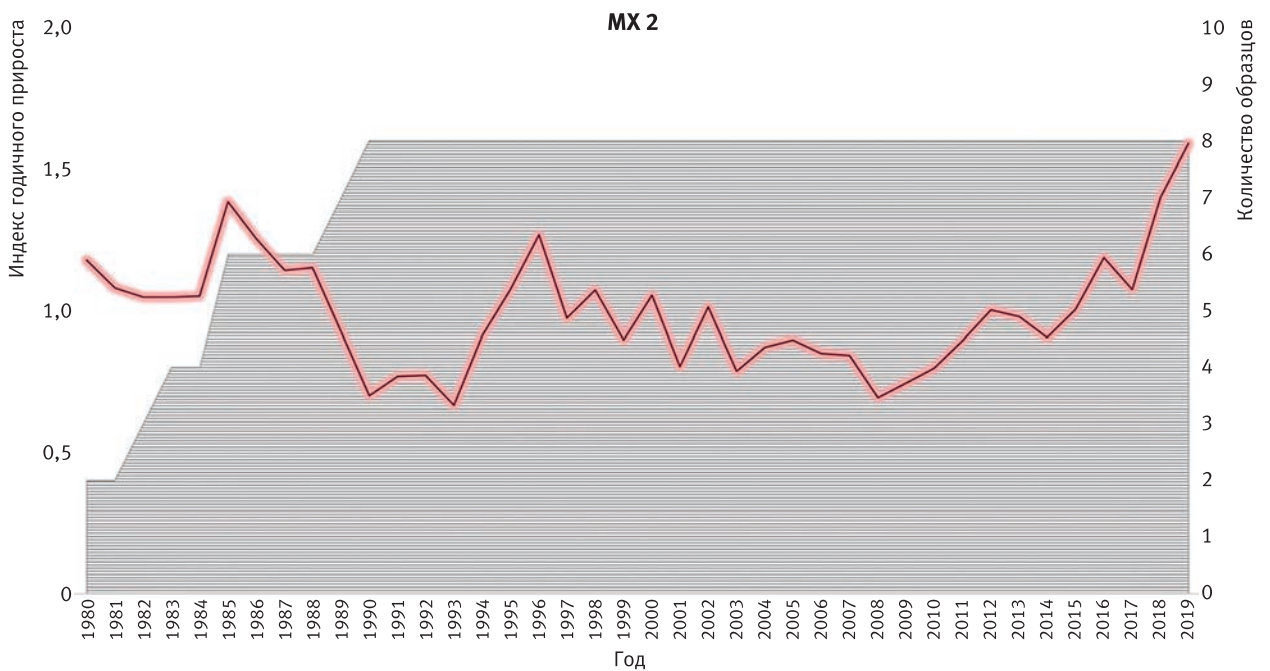


Рис. 7. Индексированная ДКХ сосны сибирской на маршрутном ходе 2

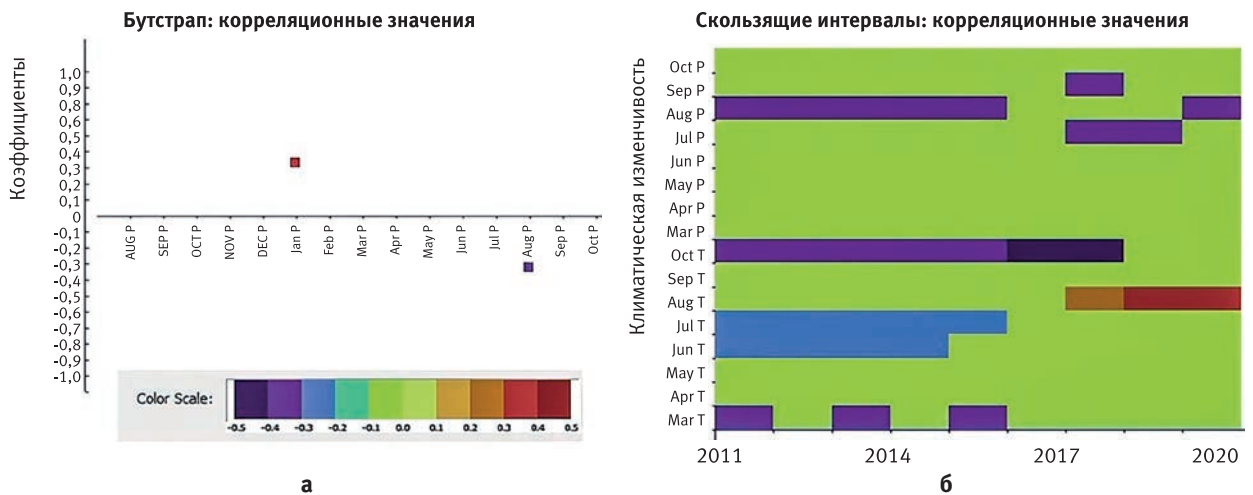


Рис. 8. Климатический анализ ДКХ сосны сибирской на маршрутном ходе 2: а – БУТСТРАП, б – СКОЛЬЗЯЩИЕ ИНТЕРВАЛЫ

осадков января (коэффициент корреляции 0,33) указывает на то, что увеличение снежного покрова в горных условиях предотвращает глубокое промерзание почвы и в целом благоприятно сказывается на физиологических процессах. В то же время более теплые зимние условия могут способствовать успешной зимовке корневых патогенов (корневая губка), обнаруженных при обследовании на некоторых участках. Для климатического анализа маршрутных ходов 1 и 2 использованы метеоданные станции Хамар-Дабан.

### Маршрутный ход 3

Величина выраженного популяционного сигнала EPS ДКХ на маршрутном ходе 3 равна 0,87, что свидетельствует о надежности хронологии. Средний коэффициент межсерийной корреляции  $R_{bar}$  для маршрутного хода 3 равен 0,29. Индексированная ДКХ представлена на рис. 9.

Климатический анализ данных (рис. 10) показал связь ширины годичного кольца

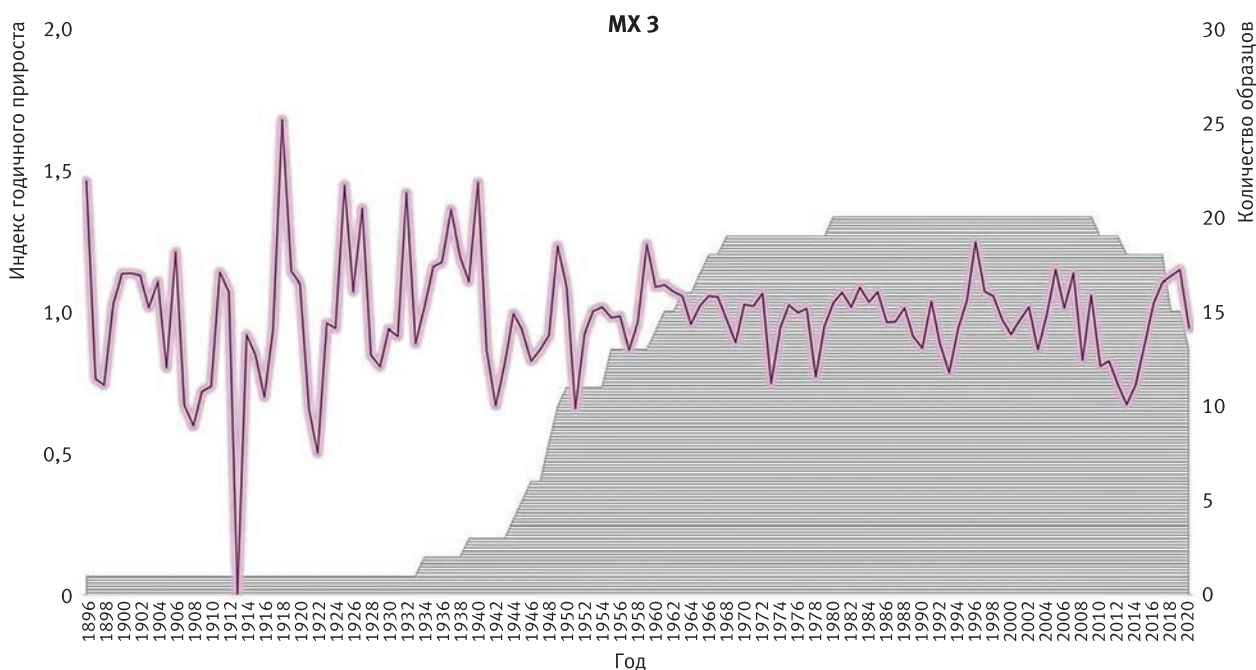


Рис. 9. Индексированная ДКХ сосны сибирской на маршрутном ходе 3

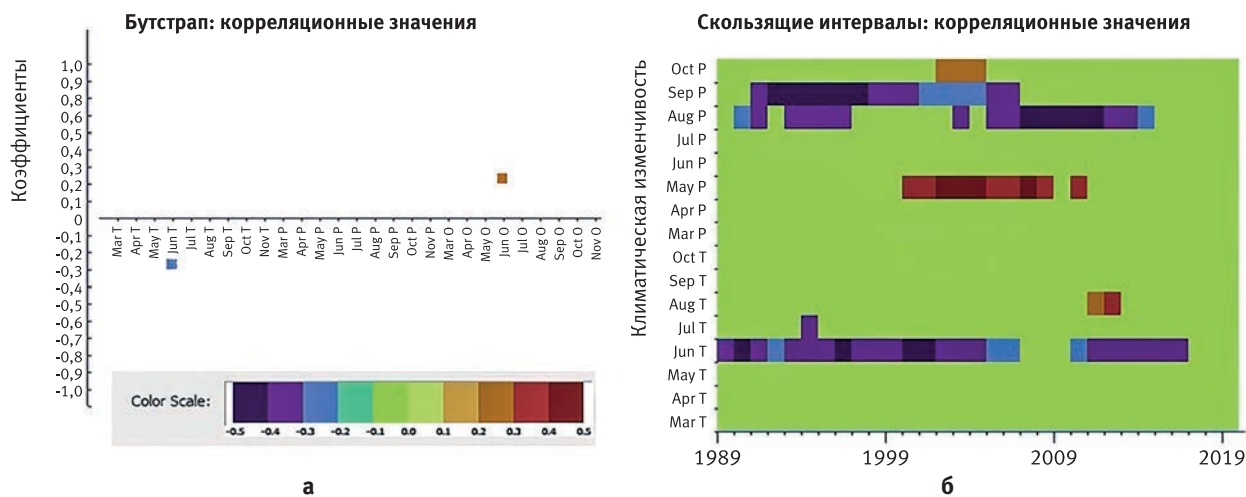


Рис. 10. Климатический анализ ДКХ сосны сибирской на маршрутном ходе 3:  
а – БУТСТРАП, б – СКОЛЬЗЯЩИЕ ИНТЕРВАЛЫ

с температурой июня, подтвержденную значениями коэффициента корреляции между рассматриваемыми показателями в диапазоне от -0,25 до -0,43. Отрицательная связь прироста с температурой может быть обусловлена увеличением транспирации и иссушением почвы в этот период.

Положительное влияние на прирост сосны сибирской на маршруте 3 оказывают осадки мая и октября, т. е. начала и конца вегетационного периода. Снижение количества осадков в сентябре отрицательно воздействует на радиальный рост. Повышение температуры июня – в период активного роста дерева, сопровождаемое дефицитом увлажнения, негативно влияет на прирост. Температура июня также оказывает существенное влияние на рост и развитие хвои, которые создают условия для интенсивного прироста древесины в июле.

#### Маршрутный ход 4

Остаточная ДКХ для маршрутного хода 4 представлена на рис. 11. Величина выраженного популяционного сигнала EPS ДКХ равна 0,87, средний коэффициент межсерийной корреляции  $R_{bar}$  равен 0,28.

На данном участке определен климатический отклик на ГТК и температуру июня текущего года, коэффициенты корреляции 0,3 и -0,28 соответственно (рис. 12). Данный маршрут располагается относительно далеко от береговой зоны, на высоте 1 230 м над уровнем моря. Условия здесь горные, поэтому летом возможен дефицит увлажнения. Это подтверждает наличие прямой зависимости гидротермического коэффициента и величины радиального прироста. Обратная зависимость с температурой июня свидетельствует об отрицательном влиянии повышения температуры, которое может вызвать засухи и последующее усыхание насаждений.

В целом для района исследования характерно отсутствие одного выраженного лимитирующего фактора в течение основного периода вегетации. Слабая климатическая составляющая в остаточных хронологиях соотносится с высокой автокорреляцией в нестандартизированных сериях, когда влияние прироста предшествующего года на прирост текущего достаточно велико. Вероятно, такое влияние связано с использованием резервных веществ, накопленных в предшествующий вегетационному сезону год.

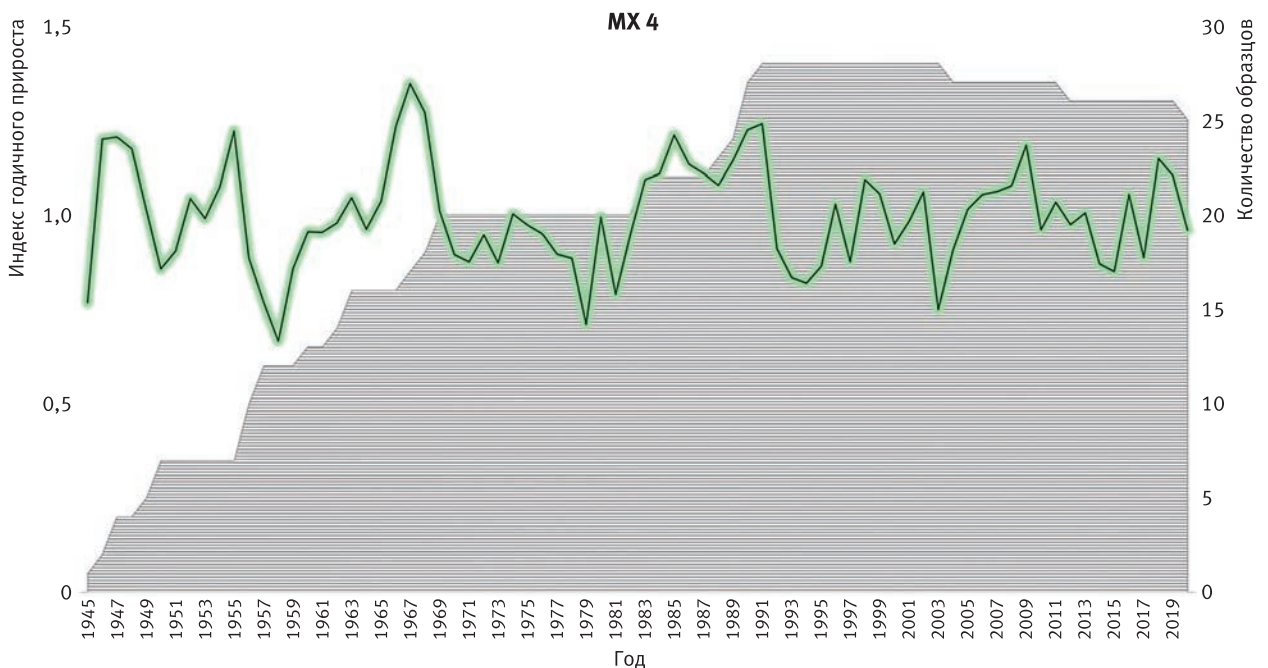


Рис. 11. Индексированная ДКХ сосны сибирской на маршрутном ходе 3

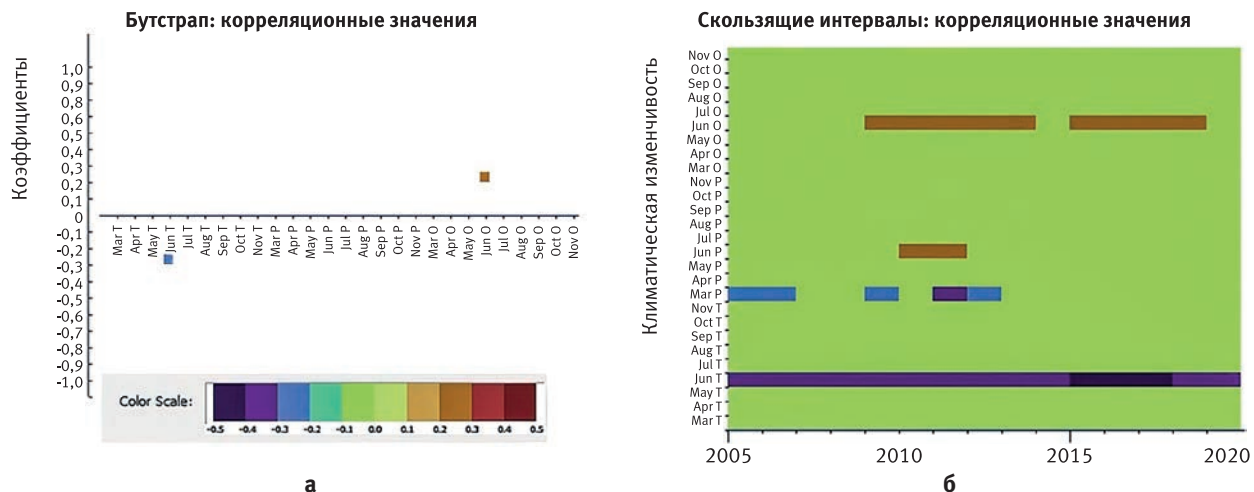


Рис. 12. Климатический анализ ДКХ сосны сибирской на маршрутном ходе 3:  
а – БУТСТРАП, б – СКОльзяЩИЕ ИНТЕРВАЛЫ

### Аномалии структуры годовых колец

Согласно данным летописи природы Байкальского заповедника, в последние десятилетия (с 1990 г.) участились случаи необычных явлений в жизни растений и фитоценозов в виде вторичного цветения, набухания почек и распускания листьев у травянистых и древесных растений в позднелетний и осенний период [28]. Так, например, в районе поселка Танхой, в нижнем течении реки Осиновки и по долине реки Выдринной в конце ноября 2011 г. наблюдалось повторное цветение шиповника,

набухание почек черемухи, а в ноябре – цветение медуницы; в конце октября 2015 и 2018 г. – вторичное цветение вербы; в октябре 2016 г. – вторичная бутонизация вербы и цветение рододендрона, сирени и шиповника; в ноябре 2019 г. – вторичное распускание листьев ольхи, набухание почек сирени. Такие явления могут быть объяснены общим региональным потеплением климата.

Сведения о необычных фенологических явлениях на изучаемой территории соотносятся с полученными данными о наличии аномалий в структуре годовых колец сосны сибирской в виде вторичного прироста (рис. 13).

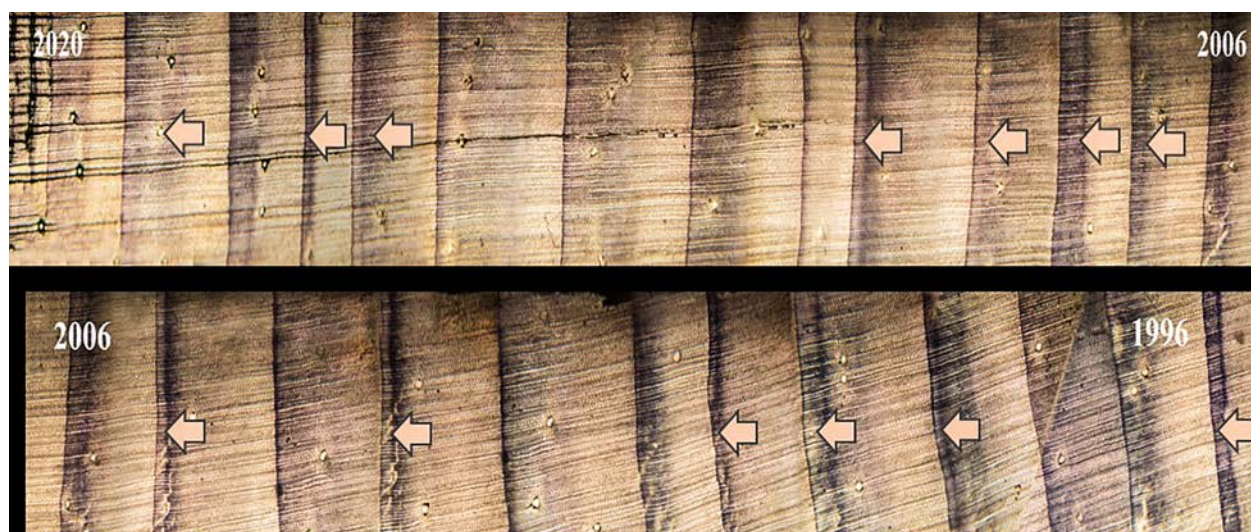


Рис. 13. ПРИМЕР НАЛИЧИЯ ВНУТРИГОДИЧНОЙ ФЛУКТУАЦИИ ПЛОТНОСТИ В ПОЗДНЕЙ ДРЕВЕСИНЕ КЕРНА КЕДРА СИБИРСКОГО

По данным распределения и встречаемости аномалий в виде вторичного прироста построена диаграмма, показывающая рост частоты появления двойных колец (рис. 14). Стоит отметить, что ввиду ограниченной поверхности образца керна невозможно идентифицировать все подобные аномалии, сформировавшиеся в дереве. Тем не менее мы полагаем, что положительный тренд в сторону увеличения количества колец с аномалиями четко прослеживается.

Анализ встречаемости аномалий показал тренд на увеличение числа и частоты их появления в последние 40 лет. Примечательно, что двойные кольца периодически появлялись и раньше, они встречались по всей длине кернов, однако после 1980-х гг. прослеживается достаточно резкое увеличение встречаемости аномалий и их количества внутри разных деревьев. Этот тренд соотносится с климатическими данными, свидетельствующими о повышении средних температур в августе–сентябре и, как следствие, возможном увеличении продолжительности сезона роста.

## Заключение

Дендрохронологический анализ насаждений сосны сибирской (кедра сибирского) на территории горного хребта Хамар-Дабан выявил наличие связи между климатическими показателями региона и радиальным ростом деревьев: общее потепление способствует увеличению продолжительности сезона роста и появлению аномалий структуры годичного кольца в виде двойного прироста.

Основными климатическими факторами, воздействующими на процесс радиального роста древесных растений, являются температура воздуха и осадки. Влияние температуры снижается при движении с севера на юг, а осадков – с юга на север. В нашем исследовании оценить общий вклад климатических переменных в изменчивость индексов прироста оказалось достаточно сложно, и результаты неоднозначны по набору и знаку. Это свидетельствует об отсутствии одного сильного или ярко выраженного лимитирующего фактора в регионе. Непоследовательные, а иногда и противоречивые реакции

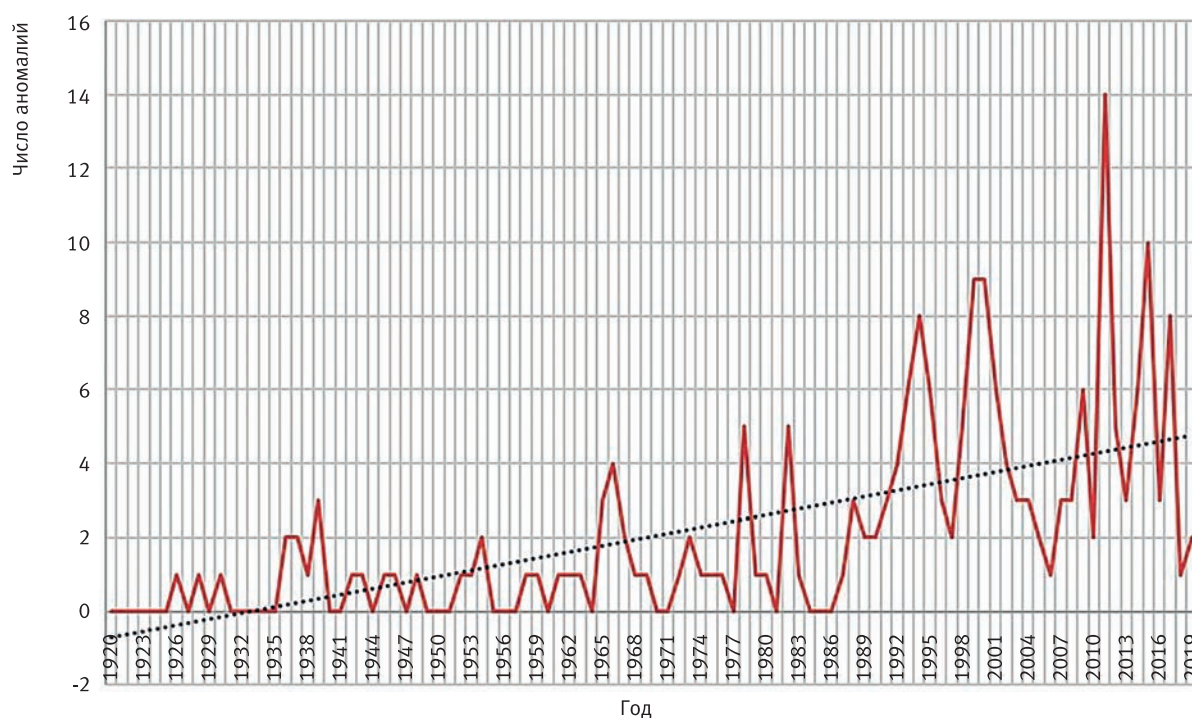


Рис. 14. ВСТРЕЧАЕМОСТЬ ДВОЙНЫХ ПРИРОСТОВ ЗА СЕЗОН В СТРУКТУРЕ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

на потепление климата, наблюдаемые в эмпирических исследованиях, могут быть объяснены сложностью взаимодействующих факторов локального масштаба.

Другим объяснением отсутствия сильных климатических сигналов в исследуемых хронологиях может быть влияние неклиматических внешних факторов, например местных условий и конкуренции. Тем не менее репликации образцов на маршрутных ходах было достаточно для дендроклиматического анализа, на что указывают высокие значения EPS.

Несмотря на это, анализ климатических данных показал тенденцию к повышению температуры воздуха и снижению количества осадков в июне–июле, что соотносится со сведениями об участившихся засухах. При этом увеличение температуры и количества осадков в августе–сентябре оказывает положительное влияние на радиальный рост деревьев: оно способствует формированию дополнительных рядов клеток

ранней древесины и образованию двойных колец. Также существует тренд к потеплению осеннего периода и, соответственно, увеличению продолжительности сезона роста древесных и травянистых растений.

Предполагаем, что в новых климатических условиях с более теплыми зимами и засушливым летом происходит более активное проявление различных патогенов, например бактериальной водянки хвойных, которая, согласно ряду исследований, в хронической форме практически постоянно присутствует в древостоях.

В целом выполненное исследование подтверждает свидетельства об участившихся засухах в регионах северных широт, проявление которых может являться первопричиной ослабления и снижения функциональной устойчивости темнохвойных насаждений, что, в свою очередь, способствует привлечению вредных организмов, формирующих очаги массового размножения на ослабленных деревьях.

## Список источников

1. Гродницкая, И.Д. Причины усыхания кедровых лесов (*Pinus sibirica* Du Tour) в естественных и искусственных фитоценозах Восточной Сибири / И.Д. Гродницкая, В.А. Сенашова, О.Э. Кондакова // Материалы международной конференции IX чтения памяти О.А. Катаева. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, 2016. – С. 23.
2. Ставников, Д.Ю. Факторы деструкции темнохвойной тайги Хамар-Дабана (Южное Прибайкалье): автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Д.Ю. Ставников. – Улан-Удэ : Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, 2013. – 22 с.
3. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья / В.И. Харук, С.Т. Им, И.А. Петров, М.Н. Ягунов // Сибирский экологический журнал. – 2016. – Т. 23. – № 5. – С. 750–760.
4. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia / V.I. Kharuk, S.T. Im, I.A. Petrov, A.S. Golyukov, K.J. Ranson, M.N. Yagunov // *Forest Ecology and Management*. – 2017. – Vol. 384. – P. 191–199.
5. Decline of dark coniferous stands in Baikal Region / V.I. Kharuk, S.T. Im, I.A. Petrov, M.N. Yagunov // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2016. – Т. 9. – № 5. – С. 617–625.
6. Steinkamp J., Hickler T. Is drought-induced forest dieback globally increasing? / J. Steinkamp, T. Hickler // *Journal of Ecology*. – 2015. – Vol. 103. – № 1. – P. 31–43.
7. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests / C. Peng, Z. Ma, X. Lei, Q. Zhu, H. Chen, W. Wang, S. Liu, W. Li, X. Fang, X. Zhou // *Nature Climate Change*. – 2011. – Vol. 1. – № 9. – P. 467–471.
8. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests: Adaptation of forests and forest management to changing climate / C.D. Allen, A.K. Macalady [and etc.] // *Forest Ecology and Management*. – 2010. – Vol. 259. – № 4. – P. 660–684.
9. Drought-induced tree mortality: Ecological consequences, causes, and modeling / W. Wang, C. Peng, D. Kneeshaw, G. Larocque, Z.-B. Luo // *Environmental Reviews*. – 2012. – Т. 20. – С. 109–121.
10. Chronology of hydraulic vulnerability in trunk wood of conifer trees with and without symptoms of top dieback / S. Rosner, S. Luss, J. Světlík, K. Andreassen, J. Børja, L. Dalsgaard, R. Evans, O.E. Tveito, S. Solberg // *Journal of Plant Hydraulics*. – 2016. – Vol. 3. – P. 1–5.
11. Методы дендрохронологии. – Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учебно-методич. пособ. / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, В.Б. Круглов, В.С. Мазепа, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров. – Красноярск : КрасГУ, 2000. – 80 с.
12. Бабушкина, Е.А. Факторы динамики радиального прироста и структуры годичных колец древесных растений в семиаридных экосистемах юга Сибири / Е.А. Бабушкина. – Абакан : Хакасский технический институт – филиал ФГАУ ВО «Сибирский федеральный университет», 2020. – 358 с.
13. Wimmer, R. Wood anatomical features in tree-rings as indicators of environmental change / R. Wimmer // *Dendrochronologia*. – 2002. – Т. 20. – № 1–2. – С. 21–36.
14. Мартынюк, А.А. Изменения климата и леса: возможные последствия и план действий / А.А. Мартынюк, А.Н. Филипчук // *Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика*. – 2017. – Т. 5. – № 1 (27). – С. 276–279.
15. Огородникова, Л.Ю. Хамар-Дабан – горная страна / Л.Ю. Огородникова, Ю.М. Юрин. – Омск : Омская картографическая фабрика ГУГК СССР, 1990.
16. Растительность хребта Хамар-Дабан. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1988. – 113 с.
17. О Правилах санитарной безопасности в лесах. – Текст : электронный. Постановление Правительства РФ от 20.05.2017 № 607. – Режим доступа: URL: <http://docs.cntd.ru/document/436736467> (дата обращения: 01.11.2018).
18. Воронин, В.И. Бактериальная водянка хвойных в байкальских лесах: причины возникновения и риск



эпифитотии / В.И. Воронин // Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды: сб. матер. конф. – Иркутск, 2018. – С. 9–12.

19. Черпаков, В.В. Бактериальная водянка: поражаемые виды хвойных пород России / В.В. Черпаков // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2012. – № 33. – С. 111–115.

20. Черпаков, В.В. Бактериальная водянка в темнохвойных лесах Хамар-Дабана (Южное Прибайкалье) / В.В. Черпаков // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2019. – № 55. – С. 110–116.

21. Бактериальное повреждение кедровых лесов Прибайкалья. – Текст: электронный / В.И. Воронин, Т.И. Морозова, Д.Ю. Стаников, И.А. Нечесов, В.А. Осолоков, В.А. Буянтуев. – 2013. – № 3. – С. 39–41. – Режим доступа: [100-bal.ru/voennoe/11447/index.html](http://100-bal.ru/voennoe/11447/index.html).

22. No systematic effects of sampling direction on climate-growth relationships in a large-scale, multi-species tree-ring data set / U. Gut, M. Árvai, S. Bijak [and etc.] // *Dendrochronologia*. – 2019. – Vol. 57. – 125624.

23. Cook, E.R. *Methods of Dendrochronology: applications in the environmental sciences* / E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. – New York : Springer Science + Business Media Dordrecht, 1992. – 132 p.

24. Тайга-V: прибор для дендрохронологических измерений / Ю.С. Ачиколова, В.М. Сидоренков, О.Э. Астапов, С.В. Чумичёв // Сохранение и рациональное использование биологических ресурсов в системе устойчивого лесопользования. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 2022. – С. 148–150.

25. Grissino-Mayer, H. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA / H. Grissino-Mayer // *Tree-ring research*. – 2001. – Vol. 57 (2). – P. 205–221.

26. Bunn, A.G. A dendrochronology program library in R (dplR) / A.G. Bunn // *Dendrochronologia*. – 2008. – Vol. 26. – № 2. – P. 115–124.

27. Biondi, F. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies / F. Biondi, K. Waikul // *Computers & Geosciences*. – 2004. – Vol. 30. – № 3. – P. 303–311.

## References

1. Grodnickaya, I.D. Prichiny usyhaniya kedrovyyh lesov (*Pinus sibirica* Du Tour) v estestvennyh i iskusstvennyh fitocenozah Vostochnoj Sibiri / I.D. Grodnickaya, V.A. Senashova, O.E. Kondakova // *Materialy mezhdunarodnoj konferencii IX chteniya pamyati O.A. Kataeva*. – Sankt-Peterburg : Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet, 2016. – С. 23.

2. Stavnikov, D.Yu. Faktory destrukcii temnohvojnoj tajgi Hamar-Dabana (Yuzhnoe Pribajkal'e): avtoref. diss. ... kand. biol. nauk / D.Yu. Stavnikov. – Ulan-Ude : Sibirskij institut fiziologii i biohimii rastenij SO RAN, 2013. – 22 s.

3. Usyhanie temnohvojnyh drevostoev Pribajkal'ya / V.I. Haruk, S.T. Im, I.A. Petrov, M.N. Yagunov // *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. – 2016. – T. 23. – № 5. – С. 750–760.

4. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia / V.I. Kharuk, S.T. Im, I.A. Petrov, A.S. Golyukov, K.J. Ranson, M.N. Yagunov // *Forest Ecology and Management*. – 2017. – Vol. 384. – P. 191–199.

5. Decline of dark coniferous stands in Baikal Region / V.I. Kharuk, S.T. Im, I.A. Petrov, M.N. Yagunov // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2016. – T. 9. – № 5. – С. 617–625.

6. Steinkamp J., Hickler T. Is drought-induced forest dieback globally increasing? / J. Steinkamp, T. Hickler // *Journal of Ecology*. – 2015. – Vol. 103. – № 1. – P. 31–43.

7. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests / S. Peng, Z. Ma, H. Lei, Q. Zhu, N. Chen, W. Wang, S. Liu, W. Li, H. Fang, H. Zhou // *Nature Climate Change*. – 2011. – Vol. 1. – № 9. – P. 467–471.

8. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests: Adaptation of forests and forest management to changing climate / C.D. Allen, A.K. Macalady [and etc.] // *Forest Ecology and Management*. – 2010. – Vol. 259. – № 4. – P. 660–684.

9. Drought-induced tree mortality: Ecological consequences, causes, and modeling / W. Wang, S. Peng, D. Kneeshaw, G. Larocque, Z.-B. Luo // *Environmental Reviews*. – 2012. – Т. 20. – С. 109–121.
10. Chronology of hydraulic vulnerability in trunk wood of conifer trees with and without symptoms of top dieback / S. Rosner, S. Luss, J. Světlík, K. Andreassen, J. Borja, L. Dalsgaard, R. Evans, O.E. Tveito, S. Solberg // *Journal of Plant Hydraulics*. – 2016. – Vol. 3. – P. 1–5.
11. Metody dendrohronologii. – CH.I. Osnovy dendrohronologii. Sbor i poluchenie drevesno-kol'cevoj informacii: uchebno-metodich. posob. / S.G. Shiyatov, E.A. Vaganov, A.V. Kirilyanov, V.B. Kruglov, V.S. Mazepa, M.M. Naurzbaev, R.M. Hantemirov. – Krasnoyarsk : KrasGU, 2000. – 80 s.
12. Babushkina, E.A. Faktory dinamiki radial'nogo prirosta i struktury godichnyh kolec drevesnyh rastenij v semiaridnyh ekosistemah yuga Sibiri / E.A. Babushkina. – Abakan : Hakasskij tekhnicheskij institut – filial FGAV VO «Sibirskij federal'nyj universitet», 2020. – 358 s.
13. Wimmer, R. Wood anatomical features in tree-rings as indicators of environmental change / R. Wimmer // *Dendrochronologia*. – 2002. – Т. 20. – № 1–2. – С. 21–36.
14. Martynyuk, A.A. Izmeneniya klimata i lesa: vozmozhnye posledstviya i plan dejstvij / A.A. Martynyuk, A.N. Filipchuk // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij HKHI veka: Teoriya i praktika. – 2017. – Т. 5. – № 1 (27). – С. 276–279.
15. Ogorodnikova, L.Yu. Hamar-Daban – gornaya strana / L.Yu. Ogorodnikova, Yu.M. Yurin. – Omsk : Omskaya kartograficheskaya fabrika GUGK SSSR, 1990.
16. Rastitel'nost' hrebta Hamar-Daban. – Novosibirsk : Nauka, Sib. otd-nie, 1988. – 113 s.
17. O Pravilah sanitarnoj bezopasnosti v lesah. – Tekst : elektronnyj. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 20.05.2017 № 607. – Rezhim dostupa: URL: <http://docs.cntd.ru/document/436736467> (data obrashcheniya: 01.11.2018).
18. Voronin, V.I. Bakterial'naya vodyanka hvojnnyh v bajkal'skih lesah: prichiny vozniknoveniya i risk epifitotii / V.I. Voronin // Mekhanizmy ustojchivosti rastenij i mikroorganizmov k neblagopriyatnym usloviyam sredy: sb. mater. konf. – Irkutsk, 2018. – С. 9–12.
19. Cherpakov, V.V. Bakterial'naya vodyanka: porazhaemye vidy hvojnnyh porod Rossii / V.V. Cherpakov // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. – 2012. – № 33. – С. 111–115.
20. Cherpakov, V.V. Bakterial'naya vodyanka v temnohvojnnyh lesah Hamar-Dabana (Yuzhnoe Pribajkal'e) / V.V. Cherpakov // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. – 2019. – № 55. – С. 110–116.
21. Bakterial'noe povrezhdenie kedrovyyh lesov Pribajkal'ya. – Tekst: elektronnyj / V.I. Voronin, T.I. Morozova, D.Yu. Stanikov, I.A. Nechesov, V.A. Oskolokov, V.A. Buyantuev. – 2013. – № 3. – С. 39–41. – Rezhim dostupa: [100-bal.ru/voennoe/11447/index.html](http://100-bal.ru/voennoe/11447/index.html).
22. No systematic effects of sampling direction on climate-growth relationships in a large-scale, multi-species tree-ring data set / U. Gut, M. Árvai, S. Bijak [and etc.] // *Dendrochronologia*. – 2019. – Vol. 57. – 125624.
23. Cook, E.R. Methods of Dendrochronology: applications in the environmental sciences / E.R. Cook, L.A. Kairiukstis. – New York : Springer Science + Business Media Dordrecht, 1992. – 132 p.
24. Tajga-V: pribor dlya dendrohronologicheskikh izmerenij / Yu.S. Achikolova, V.M. Sidorenkov, O.E. Astapov, S.V. Chumichyov // Sohranenie i racional'noe ispol'zovanie biologicheskikh resursov v sisteme ustojchivogo lesoupravleniya. – Gomel' : Institut lesa NAN Belarusi, 2022. – С. 148–150.
25. Grissino-Mayer, H. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA / N. Grissino-Mayer // *Tree-ring research*. – 2001. – Vol. 57 (2). – P. 205–221.
26. Bunn, A.G. A dendrochronology program library in R (dplR) / A.G. Bunn // *Dendrochronologia*. – 2008. – Vol. 26. – № 2. – P. 115–124.
27. Biondi, F. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies / F. Biondi, K. Waikul // *Computers & Geosciences*. – 2004. – Vol. 30. – № 3. – P. 303–311.