

*На правах рукописи*



**ПЕТРОВ Илья Андреевич**

**ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА  
ДРЕВЕСНЫЕ РАСТЕНИЯ В ГОРАХ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА**

03.02.08 - Экология (биологические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Новосибирск - 2016

Работа выполнена в Федеральном агентстве научных организаций Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель - **Харук Вячеслав Иванович**, доктор биологических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Воронин Виктор Иванович**, доктор биологических наук, ФГБУН Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, заместитель директора по научной работе;  
**Усольцев Владимир Андреевич**, доктор сельскохозяйственных наук, проф., ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор

Ведущая организация - **ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН**

Защита состоится 2017 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.058.01 при ФГБУН Центральном сибирском ботаническом саду СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск-90, ул. Золотодолинская, 101.  
Факс: (383) 330-19-86  
E-mail: [botgard@ngs.ru](mailto:botgard@ngs.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Центрального сибирского ботанического сада СО РАН. Сайт в Интернете: <http://www.csbg.nsc.ru>.

Автореферат разослан 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук



Ершова Эльвира Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Экотон горной лесотундры (переходная зона между верхним пределом произрастания возобновления и границей сомкнутых древостоев (Shiyatov et al., 2007)) является зоной, где воздействие климата на рост древесной растительности является наиболее значимым вследствие лимита роста по температуре (Holtmeier, 2009). В последние десятилетия наблюдалось продвижение древесной растительности по градиенту высоты в горах Евразии и Северной Америки (Моисеев, 2002; Klasner and Fagre, 2002; Munroe, 2003; Baker and Moseley, 2007; Kullman, 2007; Kharuk et al., 2006, 2008, 2009; Lenoir et al., 2008). Наряду с этим, происходило возрастание сомкнутости древостоев (Shiyatov et al., 2007; Devi et al., 2008; Harsch et al., 2009). Другим следствием повышения температуры стало изменение морфологии древесных растений, трансформация стелющихся и стланиковых форм в вертикальные (Holtmeier, 2009; Kharuk et al., 2009).

Изменения климата, согласно прогнозам, повлияют на видовое разнообразие и продуктивность бореальных лесов, повлекут географическое по масштабам перераспределение древесных растений (Aitken et al., 2008; IPCC 2007). В этой связи актуальна проблема воздействия изменений климата на рост основных лесообразующих видов таёжных лесов.

Изменения климата также затрагивают леса, находящиеся в более стабильных по сравнению с экотон лесотундры условиях. Сценарии климатических изменений предсказывают увеличение засушливости климата, возрастание частоты и силы засух (Aitken et al., 2008; IPCC, 2007; Sterl et al., 2008). Это может привести к падению продуктивности лесов и увеличению водного стресса и усыхания, вызванного синергией засух и климатически обусловленных изменений динамики дендрофильных насекомых и грибов (Lloyd and Bunn, 2007; Lucht et al., 2006; Scholze et al., 2006). Водный стресс приводит как к уменьшению прироста, так и к уменьшению синтеза смолы, что повышает восприимчивость деревьев к атакам насекомых. Кроме того, повышение температуры непосредственно влияет на динамику численности насекомых (Breshears et al., 2005).

В России усыхание темнохвойных лесов зафиксировано от западной границы до дальневосточного региона. В начале XXI века климатически обусловленное усыхание описано в качестве третьей по величине причины после пожаров и атак насекомых (Манько и др., 1998; Kharuk et al., 2013; Kharuk et al., 2013; Харук и др., 2016). Усыхание пихты и сосны сибирской наблюдается в горах Кузнецкого Алатау и Саян, а также в горах Забайкалья (Kharuk et al., 2013; Kharuk et al., 2013; Воронин и др., 2013).

Несмотря на то, что территория Сибири расположена в зоне наиболее сильных наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений, работы по воздействию климата на древесную растительность таёжных лесов и

лесотундры немногочисленны (Шиятов и др., 2007; Kharuk et al., 2006; Devi et al., 2008; Kharuk et al., 2008).

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является оценка воздействия изменений климата на радиальный прирост древесных растений экотона горной лесотундры и среднегорного пояса на ключевых участках Алтае-Саянского региона и хребта Хамар-Дабан. Анализировался радиальный прирост модельных пород *Pinus sibirica* Du Tour, *Larix sibirica* Ledeb., *Abies sibirica* Ledeb. и *Betula tortuosa* Ledeb..

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

Анализ динамики верхней границы леса и сравнительный анализ радиального прироста деревьев *Pinus sibirica*, *Larix sibirica*, *Abies sibirica* и *Betula tortuosa* в экотоне горной лесотундры Алтае-Саянского региона.

Выявление связей между радиальным приростом деревьев *Pinus sibirica*, *Larix sibirica*, *Abies sibirica* и *Betula tortuosa* и климатическими факторами в экотоне горной лесотундры Алтае-Саянского региона.

Анализ воздействия изменений климата на радиальный прирост и жизненное состояние *Pinus sibirica* и *Abies sibirica* в зонах усыхания древостоев в среднегорном поясе Кузнецкого Алатау, Восточного Саяна и Прибайкалья (хребет Хамар-Дабан).

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. В экотоне горной лесотундры Алтае-Саянского региона происходит увеличение радиального прироста *Pinus sibirica*, *Larix sibirica*, *Abies sibirica*, коррелирующее с возрастанием температуры, начавшемся в 1970-х годах, и наблюдается продвижение указанных видов по градиенту высоты.

2. В зонах усыхания кедровых и пихтовых древостоев Кузнецкого Алатау, Восточного Саяна и Прибайкалья (хребет Хамар-Дабан) радиальный прирост усыхающих деревьев *Pinus sibirica* и *Abies sibirica* коррелирует с индексом сухости SPEI, влажностью корнеобитаемого слоя и упругостью водяного пара, что указывает на водный стресс как первопричину усыхания деревьев, синергизм климатических и биотических факторов повлек усыхание темнохвойных древостоев.

**Научная новизна работы.** Выявлено, что в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау, Западного Саяна и южного Алтая наблюдается увеличение радиального прироста и продвижение верхней границы леса по градиенту высоты. На основе ретроспективного анализа выявлено, что возрастание радиального прироста и численности древесных растений в экотоне горной лесотундры совпадает с началом периода потепления, последовавшего за концом Малого Ледникового Периода (вторая половина XIX века).

Установлено, что увеличение радиального прироста в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау, Западного Саяна и южного Алтая во второй половине XX века коррелирует с увеличением среднегодовой температуры за исследуемый период.

Впервые для районов усыхания *Pinus sibirica* в среднегорном поясе Кузнецкого Алатау и хребта Хамар-Дабан, а также *Abies sibirica* в среднегорном поясе Восточного Саяна показана связь радиального прироста усыхающих деревьев с индексом сухости SPEI и упругостью водяного пара. Для сосны сибирской хребта Хамар-Дабан показана связь прироста с увлажненностью корнеобитаемого слоя.

**Практическая значимость.** Выявленная связь усыхания древесных растений пихты и сосны сибирской с изменениями климата (упругостью водяного пара, влажностью корнеобитаемого слоя, индексом сухости SPEI) указывает на необходимость планирования лесовосстановительных работ с учетом устойчивости различных видов древесных растений к наблюдаемым изменениям климата. Данные по динамике влажности корнеобитаемого слоя и индекса сухости SPEI могут быть использованы при выделении зон повышенного риска усыхания темнохвойных древостоев.

Данные по сравнительной динамике и климатическому отклику радиального прироста *Pinus sibirica*, *Larix sibirica*, *Abies sibirica* и *Betula tortuosa* представляют экспериментальный материал для верификации моделей изменений климата.

**Личное участие автора.** Все исследования по теме диссертации от сбора экспериментального материала до его анализа осуществлены автором или при его непосредственном участии в период с 2012 по 2016 год. Образцы, собранные в 2011 году на территории Республики Алтай, были предоставлены для исследований из фонда лаборатории мониторинга леса ИЛ СО РАН.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований доложены на конференциях молодых ученых Института леса им. В.Н. Сукачева (Красноярск, 2013, 2014, 2015), конференции КНЦ СО РАН (2014), Международной конференции, посвященной 125-летию кафедры ботаники (Томск, 2013); Международной конференции «РусДендро» (Бишкек – Чолпон-Ата, 2014); Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 70-летию создания Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (Красноярск, 2014); Всероссийской конференции с международным участием «Защита лесов от вредителей и болезней: научные основы, методы и технологии» (Иркутск – Танхой, 2015); III (XI) Международной Ботанической Конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 2015).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 13 работ, из них 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, 9 – материалы конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Текст работы изложен на 144 страницах, иллюстрирован 3 таблицами и 41 рисунком. Список использованной литературы содержит 222 источника, из которых 126 работ на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор выражает благодарности за помощь в сборе материала и работе над диссертацией, советы и рекомендации руководителю д.б.н., заведующему лаборатории мониторинга леса ИЛ СО РАН Харуку В.И. За помощь в сборе материала, а также предоставленные для работы данные, советы и рекомендации автор выражает благодарность к.т.н., с.н.с. Иму С.Т., к.б.н., н.с. Двинской М.Л., к.б.н., м.н.с. Шушпанову А.С., к.ф.-м.н., с.н.с. Кофману Г.Б.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ**

Начиная с 1976, потепление температуры проходит примерно в три раза быстрее, чем за предшествующее столетие (WMO, 2002), что воздействует на динамику лесной растительности, приводит к возрастанию продуктивности древостоев, изменению видового разнообразия лесных сообществ вследствие экспансии более требовательных к климатическим условиям видов (Grabherr, Pauli, 1994; Beniston, 2003; Walther, 2003). В большом количестве публикаций (Kullman, 1979; Hughes et al, 1999; Sturm et.al., 2001; Grace et al., 2002; Shiyatov, 2003; Kullman, 2005; Харук и др., 2005; Kharuk et. al., 2006; Kharuk et al., 2006; Baker and Moseley, 2007; Kullman, 2007; Shiyatov et al., 2007; Devi et al., 2008; Kharuk et al.2008; Harsch et al., 2009; Kharuk et al., 2009; Петров и др., 2015) отмечается, что за последнее столетие в экотоне горной лесотундры практически по всей циркумбореальной зоне происходит продвижение древесной растительности по градиенту высоты, а также возрастание сомкнутости древостоев, согласующиеся с изменениями климата. При этом в ряде публикаций отмечается, что возрастание сомкнутости и продуктивности древесной растительности не всегда сопровождается её продвижением по градиенту высоты, как в экотоне горной лесотундры, так и на северной границе распространения (Masek 2001; Klasner and Fagre 2002; Körner, 2005). При этом отмечается увеличение сомкнутости лесов и, соответственно, переход тундровых территорий в редколесье (Kullman, 2005).

С другой стороны изменения климата негативно влияют на жизненное состояние древостоев, находящихся в зоне, где дефицит тепла не является основным лимитирующим прирост фактором. Влияние потепления и водного стресса как факторов усыхания лесов отмечено в ряде публикаций (Peñuelas et al., 2001; Breshears, 2005; Guarin, 2005; Breda et al., 2006; Landmann, Dreyer, 2006; Bigler et al., 2006; Dobbertin, Rigling, 2006; Hogg, 2008; Worrall, 2010; Anderegg, 2012). Кроме того, ухудшение жизненного состояния древостоев под воздействием водного стресса и периодических засух индуцирует массовое распространение грибных инфекций и дендрофильных насекомых; в тоже время, изменения климата также способствуют массовому размножению насекомых (Kharuk et al., 2004; Anderegg, 2012a; Anderegg, 2012b; Fettig et al. 2013; Баранчиков, 2014).

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

### Объекты исследования

Исследуемые территории находятся в пределах Алтае-Саянской горной страны, а также хребта Хамар-Дабан (рис. 1). Полевые исследования проводились в экотоне горной лесотундры Алтая, Кузнецкого Алатау и Западного Саяна, а также в лесном поясе Кузнецкого Алатау, Восточного Саяна и хребта Хамар-Дабан.

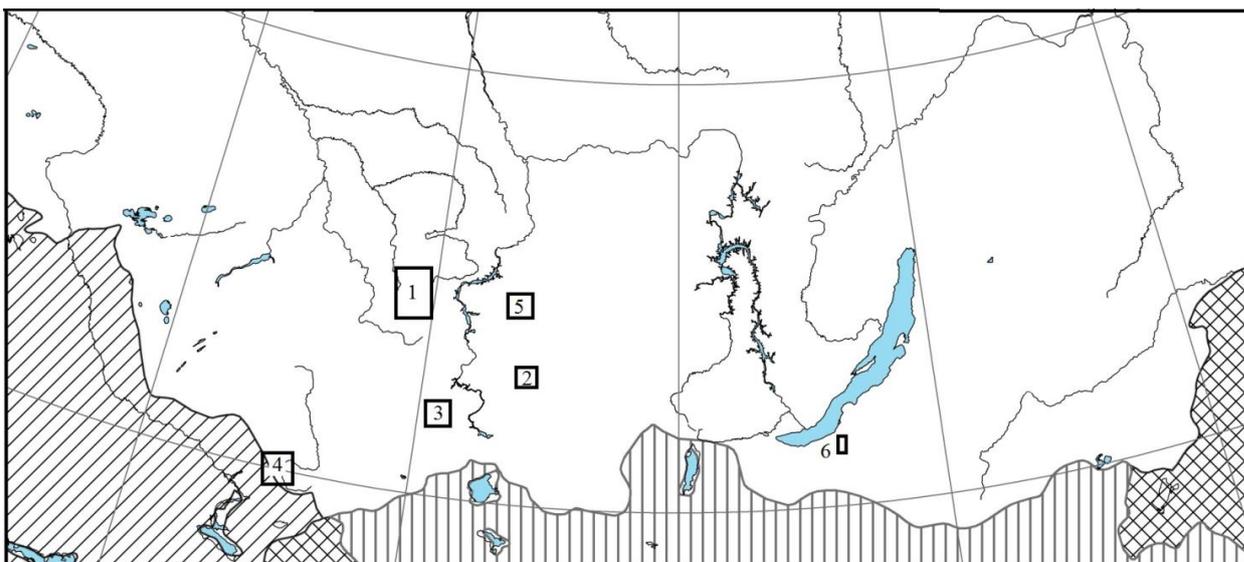


Рисунок 1. Карта районов исследования: 1 – Кузнецкий Алатау, 2 и 3 – Западный Саян, 4 – Алтай, 5 – Восточный Саян, 6 – Хамар-Дабан.

Субальпийский пояс **Кузнецкого Алатау** (1100-1350 м) занимают луга и редколесья, сформированные *Larix sibirica*, *Pinus sibirica*, *Abies sibirica* и *Betula tortuosa*. В данном поясе заложены три пробные площади на восточном макросклоне: две – южнее и севернее поселка Приисковый, одна – западнее поселка Коммунар. Верхняя и средняя части лесного пояса (600-1100 м) представлены преимущественно древостоями кедра с примесью пихты и ели. В данном поясе заложены четыре пробные площади: три в бассейне реки Черный Июс, одна – севернее посёлка Белогорск. Климат исследуемой территории континентальный. На склонах западной экспозиции сумма годовых осадков составляет 600-800 мм, в то время как в центральной наветренной части гор выпадает до 1500 мм осадков в год. Средние температуры января и июля  $-15,3^{\circ}\text{C}$  и  $+13,4^{\circ}\text{C}$ , соответственно.

Исследуемый участок на территории **Западного Саяна** располагался в экотоне горной лесотундры. Пробная площадь закладывалась на границе республик Хакасия и Тува в районе Сотого перевала. Вторая пробная площадь была заложена в природном парке Ергаки в окрестностях Каменного города. Древесная растительность представлена *Pinus sibirica* с примесью *Abies sibirica* и *Larix sibirica*. Климат характеризуется как резко континентальный, средние температуры января от  $-28^{\circ}$  до  $-34^{\circ}\text{C}$ , июля от 10

до 12°C. Преимущественно осадки выпадают летом. Их количество изменяется от 1000 до 1500 мм/год в зависимости от направления склона.

Исследуемый участок в регионе **южного Алтая** расположен на высоте 2200 м в окрестностях Красной горы. На участке древесная растительность экотона горной лесотундры сформирована преимущественно кедром с примесью лиственницы и ели. Средние температуры июля от 7 до 8°C, января -17°C. Преимущественно осадки выпадают летом, около 700 мм.

В среднегорном поясе **Восточного Саяна** заложены 8 пробных площадей на высотах 650-900 метров в бассейне реки Сисим. Леса представлены пихтовыми древостоями с примесью кедра, ели и березы. Средние температуры зимнего периода -20°C, летнего 15°C. Годовая сумма осадков около 700 мм.

На территории **хребта Хамар-Дабан** заложено 6 пробных площадей на высотах от 700 до 1000 метров, где преобладают пихтово-кедровые древостои. Исследования выполнялись по трансекте, ориентированной по градиенту высоты; начало трансекты соответствовало границе сомкнутых темнохвойных древостоев в долине р. Мысовка, конец – границе сомкнутых темнохвойных древостоев на южном склоне Хамар-Дабана. Среднемесячная температура воздуха на северном макросклоне Хамар-Дабана составляет в июле 14-18 °C; зимние температуры изменяются в пределах от -11°C до -25°C. В горах годовая сумма осадков может составлять до 1450 мм.

### **Методика проведения работ в экотоне горной лесотундры**

Для проведения анализа было отобрано 403 образца в экотоне горной лесотундры. В экотоне горной лесотундры при проведении полевых исследований на склоне закладывались трансекты от верхней границы произрастания деревьев до границы сомкнутого леса. В пределах трансекты закладывались учетные площадки, размер которых варьировал в зависимости от густоты древостоя от 3x3 до 10x10 м (при трехкратной повторности); подсчитывалось общее количество возобновления (высотой до 2.5 м), фиксировались координаты центра каждой УП, описывался тип леса, видовой состав древостоя, рельеф, средние диаметр и высота деревьев, экзогенные воздействия (такие как пожары, рубки), кустарниковый ярус, мертвый и живой напочвенный покров, тип почвы. Сбор образцов проводился в пределах трансекты, на некоторых ПП фиксировались координаты модельных деревьев. Образцы отбирались преимущественно в виде спилов.

Обработка и анализ образцов проводились по стандартным дендрохронологическим методикам с применением программ TSAP-DOS, COFESHA, ARSTAN, STATISTICA. Поверхность каждого образца зачищалась, контрастировалась, ШГК измерялись на установке Lintab 3, таким образом были получены индивидуальные абсолютные хронологии для каждого модельного дерева, которые впоследствии подвергались перекрестной датировке и детрендриванию для получения остаточных

хронологий. Для каждого местообитания по образцам каждого вида были построены усреднённые и остаточные хронологии.

Для проведения дендроклиматического анализа использовались данные с метеостанций Ненастная (Кузнецкий Алатау, индекс ВМО 29752), Оленья Речка (Западный Саян, индекс ВМО 29974), Кара-Тюрек (Алтай, индекс ВМО 36442).

### **Методика работы в зонах усыхания темнохвойной тайги**

Для проведения анализа было отобрано 379 образцов в зонах усыхания темнохвойной тайги. В ходе наземных обследований в зонах усыхания темнохвойных лесов производилась закладка круговых перечетных площадок постоянного радиуса (ПП) радиусом 9.8 метра. Фиксировались координаты центра каждой ПП, описание проводилось аналогично предыдущей методике. Образцы отбирались как в виде кернов, так и в виде дисков.

Обработка и анализ образцов проводились по стандартным дендрохронологическим методикам с применением программ TSAP-DOS, COFESHA, ARSTAN, STATISTICA. Для каждого местообитания по полученным образцам были построены стандартизированные хронологии. Для проведения анализа образцы кедра и пихты были разделены на две группы («усыхающие» и «живые»), различающиеся по характеристикам прироста за последнее десятилетие.

Для проведения исследований использовались преимущественно метеоданные, рассчитанные по градам для ячеек  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ . Исключение составляют данные, полученные для хребта Хамар-Дабан с одноименной метеостанции. Использовались также данные индекса сухости SPEI и влагосодержания почвы.

## **ГЛАВА 3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХРОНОЛОГИЙ *PINUS SIBIRICA*, *LARIX SIBIRICA*, *ABIES SIBIRICA* И *BETULA TORTUOSA* ЭКОТОНА ГОРНОЙ ЛЕСОТУНДРЫ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА**

### **Общий анализ хронологий**

В экотоне горной лесотундры исследуемых территорий наблюдается увеличение радиального прироста, согласующееся с потеплением последних десятилетий. Тренд увеличения радиального прироста наблюдается с начала 1970-х годов, у ряда хронологий также прослеживается ускорение прироста в начале 2000-х. Прирост кедра за период 1990-2010 вырос по сравнению с периодом 1950-1970, который предшествовал потеплению, на 35%-140%, пихты – на 60%-210%, лиственницы – на 35%, березы – на 10%-20%. Также зафиксирована значимая корреляционная связь между хронологиями с различных пробных площадей. Для кедра данный показатель составляет в среднем 0,66 (0,72 после обработки 5-летней скользящей средней). Для

пихты – 0,83, для березы – 0,38. Корреляция между хронологиями лиственницы и березы на одном местообитании составляет 0,65.

### Изменения в темпах прироста и динамики верхней границы леса деревьев экотона горной лесотундры за последнее столетие

На всех пробных площадях (ПП) зафиксировано продвижение древесной растительности по градиенту высоты (рис. 2): подрост поднимается по градиенту высоты выше спелого древостоя. На отдельных ПП были зафиксированы координаты модельных деревьев, что позволило определить скорость продвижения границы леса. Для лиственницы в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау данная скорость составила 1м/10лет, для кедра на Западном Саяне – 2 м/10лет, что согласуется с другими исследованиями, проведенными в горах Сибири.

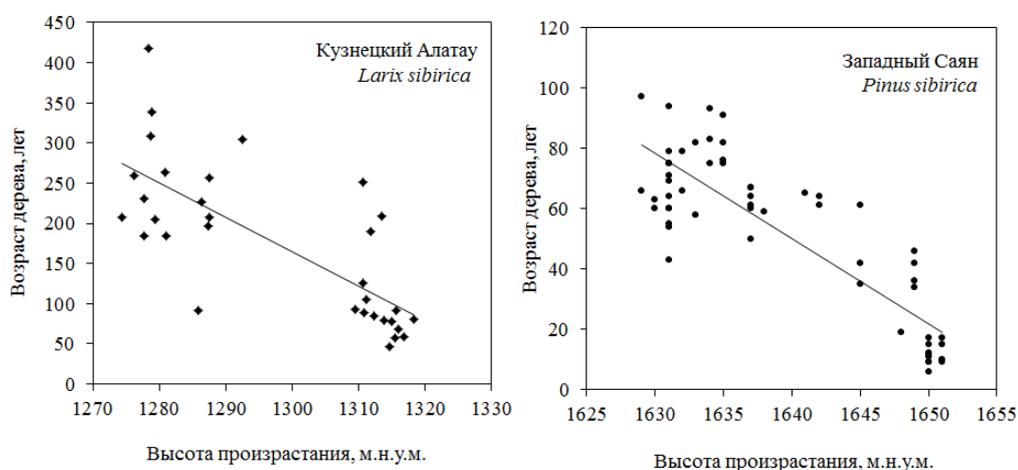


Рис. 2. Зависимость возраста деревьев от высоты произрастания

Кроме того, наблюдается увеличение суммарного радиального прироста деревьев в экотоне горной лесотундры исследуемых территорий за последнее столетие (рис. 3). Для участков, на которых выборка деревьев одного вида превышала 50 образцов, нами были составлены интегральные кривые прироста за 50 лет жизни дерева по модельным деревьям, появившимся до 1950 года и после него.

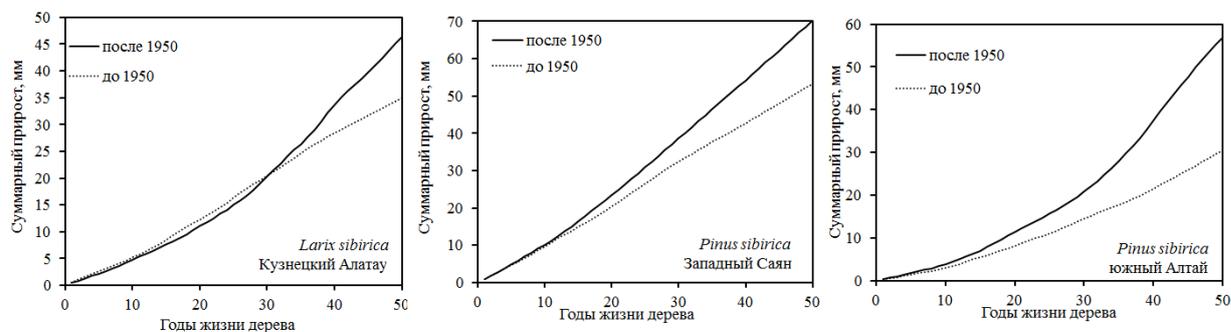


Рис. 3. Суммарный радиальный прирост деревьев за период до 1950 года и после него.

Анализ показал увеличение суммарного радиального прироста лиственницы за первые 50 лет жизни на Кузнецком Алатау на 30%, кедра в экотоне горной лесотундры Западного Саяна на 45%, кедра в экотоне горной лесотундры южного Алтая на 95%.

### **Сравнительный анализ динамики прироста «молодых» и «старовозрастных» деревьев экотона горной лесотундры**

При анализе динамики численности древесных растений исследуемых территорий выяснилось, что в начале XX века наблюдается относительно резкое возрастание численности древесных растений. При этом на Кузнецком Алатау в выборке практически отсутствуют деревья лиственницы VII-VIII классов возраста, а на Западном Саяне отсутствуют деревья кедра IV-V классов возраста, что соответствует периоду около 1850-х годов и является окончанием Малого Ледникового Периода. В южных областях Алтая данное явление практически не проявилось. При анализе хронологий данный период характеризуется спадом прироста. Для более корректной интерпретации данных выборки были разделены на деревья, появившиеся до рассматриваемого периода и после него, были составлены отдельные хронологии. Было зафиксировано, что с начала XX века тренд на увеличение прироста появляется у обеих когорт, что вместе с возрастанием численности может свидетельствовать об улучшении лесорастительных условий на верхней границе леса. Спад прироста в начале 1970-х, вероятнее всего, связан с похолоданием.

## **ГЛАВА 4. ДЕНДРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХРОНОЛОГИЙ ИССЛЕДУЕМЫХ ВИДОВ В ЭКОТОНЕ ГОРНОЙ ЛЕСОТУНДРЫ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА**

### **Анализ трендов температуры и осадков во второй половине XX века на исследуемой территории**

Ряды температур, полученные с горных метеостанций, демонстрируют высокую синхронность (коэффициент корреляции 0,93-0,95) на большой территории (удаление точек до 600 км). Происходит также повышение среднегодовых температур (в 1990-е годы аномалии среднегодовых температур достигают 1°C). Аналогичной синхронности других климатических параметров не обнаружено.

### **Анализ связи усредненных хронологий с температурой воздуха**

Предварительный анализ показал сходство динамики изменения радиального прироста и температуры (рис. 4). Были рассчитаны коэффициенты корреляции между среднегодовой температурой и ШГК, данные предварительно обрабатывались 5-летней скользящей средней. Наименьшие коэффициенты получены для хронологий березы (0,23-0,40) и лиственницы (0,51). Для хронологий кедра коэффициент варьировался от

0,51 до 0,79, для хронологий пихты – 0,79-0,86. Для дальнейшего анализа гидрологический год был разделен на теплый (стабильно положительные среднемесячные температуры, май-август) и холодный (стабильно отрицательные среднемесячные температуры, ноябрь-март) периоды, для которых были рассчитаны частные корреляции с ШГК. Было установлено, что на большинстве пробных площадей прирост деревьев кедра коррелирует преимущественно с температурами холодного периода (0,76-0,32; за единственным исключением коэффициенты выше на 0,05-0,58), в то время как прирост пихты коррелирует как с температурой теплого, так и холодного периодов (среднее значение коэффициентов корреляции 0,5). Деревья лиственницы и березы показали наименьшие коэффициенты корреляции с температурой (0,41-0,05).

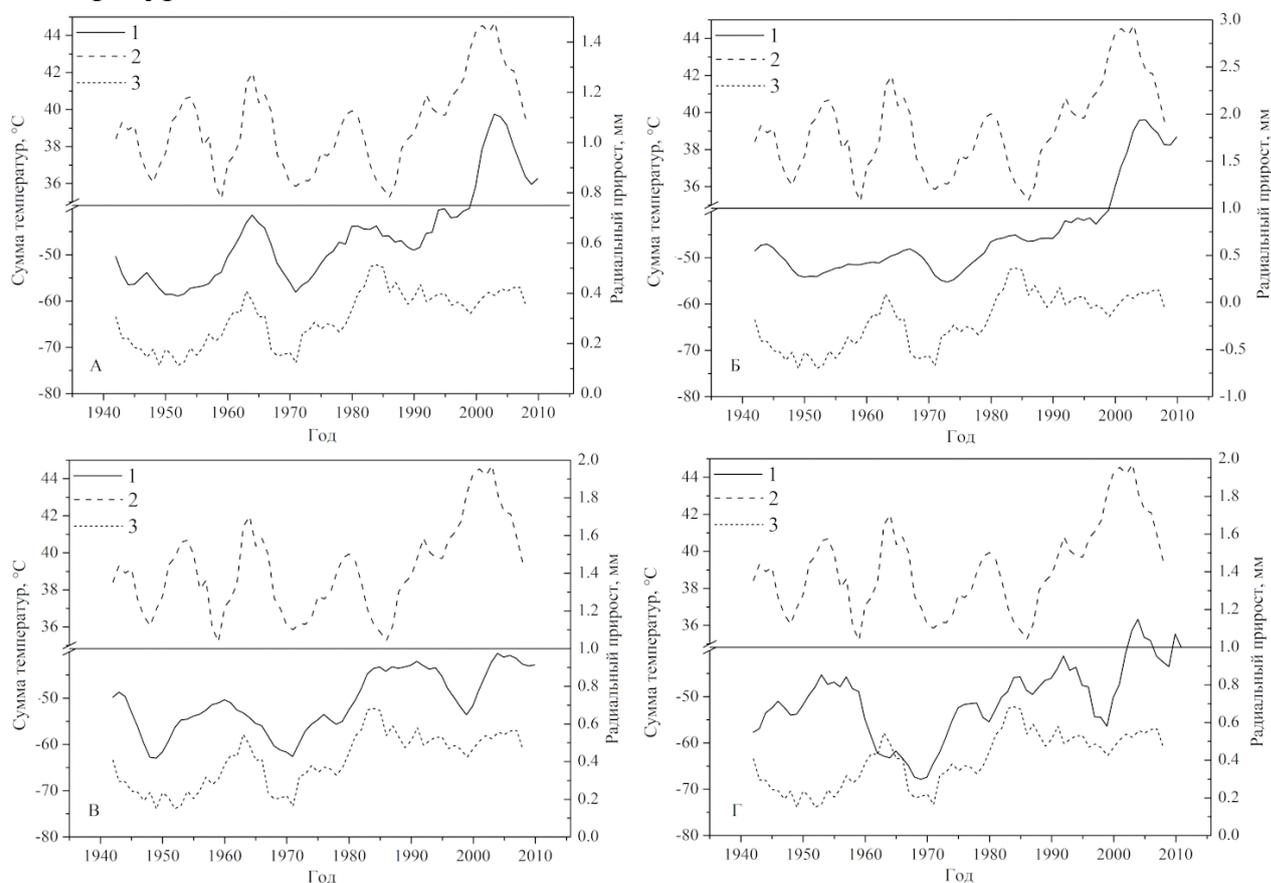


Рис. 4. Сравнение усредненных хронологий (Кузнецкий Алатау) с климатическими факторами: *Abies sibirica* (А – участок №1, Б – участок №2), *Pinus sibirica* (В, участок №1), *Larix sibirica* (Г, участок №1). 1 – хронология, 2 – сумма температур теплого периода, 3 – сумма температур холодного периода

#### Анализ связи остаточных хронологий с температурой воздуха

При сравнении остаточных хронологий исследуемых видов и параметров температуры также наблюдается значимая корреляционная связь между температурой холодного периода и приростом кедра (0,35-0,40). Для ряда хронологий кедра, а также для пихты показана связь с температурой

начала периода вегетации (май-июнь, 0,30-0,40). Отдельно стоит отметить проявившиеся отрицательные коэффициенты корреляции между приростом и температурой апреля у лиственницы (-0,45) и березы (от -0,3 до -0,4). Возможным объяснением является феномен провокации, когда оттепели в апреле стимулируют физиологическую активность растения, в то время как корни находятся в промерзшем грунте под слоем снега и не могут обеспечить поступление воды и питательных веществ. В результате может возникнуть физиологическая засуха и дефицит питательных веществ, а часто следующие за оттепелью заморозки могут повредить камбий. Таким образом, дерево приходит к началу вегетационного периода ослабленным, что сказывается на приросте. Аналогичное явление было зафиксировано для лесов Прибайкалья (Глызин, 1993; Краснобаев, Воронин, 2009; Краснобаев, Воронин, 2011).

#### **Анализ связи остаточных хронологий с суммой осадков**

Связь прироста исследуемых хронологий с осадками носит преимущественно отрицательный характер и наиболее сильно проявляется для деревьев кедра Кузнецкого Алатау (от -0,4 до -0,5). Наблюдается как связь с осадками холодного периода, так и начала периода вегетации (май-июнь). Возможно, увеличение осадков холодного периода замедляет время схода снега, что приводит к сокращению периода вегетации. Данный факт также подтверждают значимые корреляции (0,3-0,4) между приростом и количеством дней со среднесуточной температурой от +5 до +8 градусов для пихты и кедра в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау. Стоит отметить, что осадки начала периода вегетации в исследуемых районах также чаще выпадают в твердом виде, что приводит к охлаждению приповерхностного слоя воздуха и поверхности почвы, и ингибирует прирост.

#### **Анализ связи остаточных хронологий с продолжительностью солнечного сияния**

Для большинства остаточных хронологий зафиксирована положительная значимая корреляционная связь между продолжительностью солнечного сияния и радиальным приростом. В большинстве случаев данная связь проявляется в начале периода вегетации (май-июнь, значимые коэффициенты корреляции – 0,30-0,55). Для деревьев березы и лиственницы данная связь зафиксирована только в июне (0,3), что, возможно, связано с формированием хвои и листвы текущего периода вегетации, в то время как вечнозеленые виды (кедр и пихта) начинают фотосинтезировать сразу при наступлении благоприятных условий. Для деревьев пихты значимая связь проявилась в феврале, аналогичное явление было зафиксировано в литературе для высокогорий Китая (Zong Shan Li et. al., 2012), и объяснялось смягчением температурного стресса из-за увеличения поступления солнечной радиации.

## ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ХРОНОЛОГИЙ ЗОН УСЫХАНИЯ ТЕМНОХВОЙНОЙ ТАЙГИ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ, ВОСТОЧНОГО САЯНА И ХРЕБТА ХАМАР-ДАБАН

В то время как в высокогорьях, в условиях достаточного (>800 мм) увлажнения наблюдается возрастание радиального прироста кедрa и пихты, в среднегорьях и низкогорьях Алтае-Саянского региона описаны многочисленные случаи угнетения и усыхания темнохвойных древостоев (Kharuk et al, 2013). Последнее индуцировано возрастанием аридности климата, повышением частоты и интенсивности засух, а также воздействием насекомых-вредителей и грибных инфекций на ослабленные водным стрессом древостои. Отдельно стоит отметить, что в зонах усыхания отмечено и описано в литературе негативное влияние насекомых, грибов и микроорганизмов на жизненное состояние древостоев, в то же время климатическому аспекту уделяется значительно меньше внимания.

### Анализ хронологий *Pinus sibirica* зоны усыхания горной темнохвойной тайги Кузнецкого Алатау

Средний возраст «выживших» и «усыхающих» деревьев кедрa в зоне усыхания темнохвойной тайги Кузнецкого Алатау составил 154 и 173 года соответственно. Значимые различия между хронологиями рассматриваемых когорт появляются только после засухи 1998 года, сопровождавшейся падением прироста у обеих групп. В группе «усыхающих» деревьев наблюдается падение прироста, в то время как «выжившие» частично восстанавливают прирост после экстремальных климатических событий. Увеличение прироста «выживших» деревьев, вероятно, связано со снижением конкуренции из-за отпада части деревьев, так как обе группы находятся в составе одного древостоя. Однако прирост «выживших» снова падает в течение засух 2008–2009.

Корреляция между индексами прироста и климатическими параметрами проявилась только для хронологии когорты «усыхающих». При этом коэффициенты корреляции становятся значимыми только в конце 1990-х (большой частью после 1999 года). В когорте «выживших» значимых корреляций после засухи 1998 года не проявляется. Также не обнаружено значимых корреляций между радиальным приростом и показателями температуры и осадков. Преимущественно связь проявилась между упругостью водяного пара, текущего ( $r^2=0,63$ ) и предыдущего ( $r^2=0,48$ ) периода вегетации (май-август), холодного периода (январь-февраль, что, возможно, связано с зимней десикацией,  $r^2=0,64$ ), а также индексом SPEI предыдущего периода вегетации (май-август,  $r^2=0,37$ ).

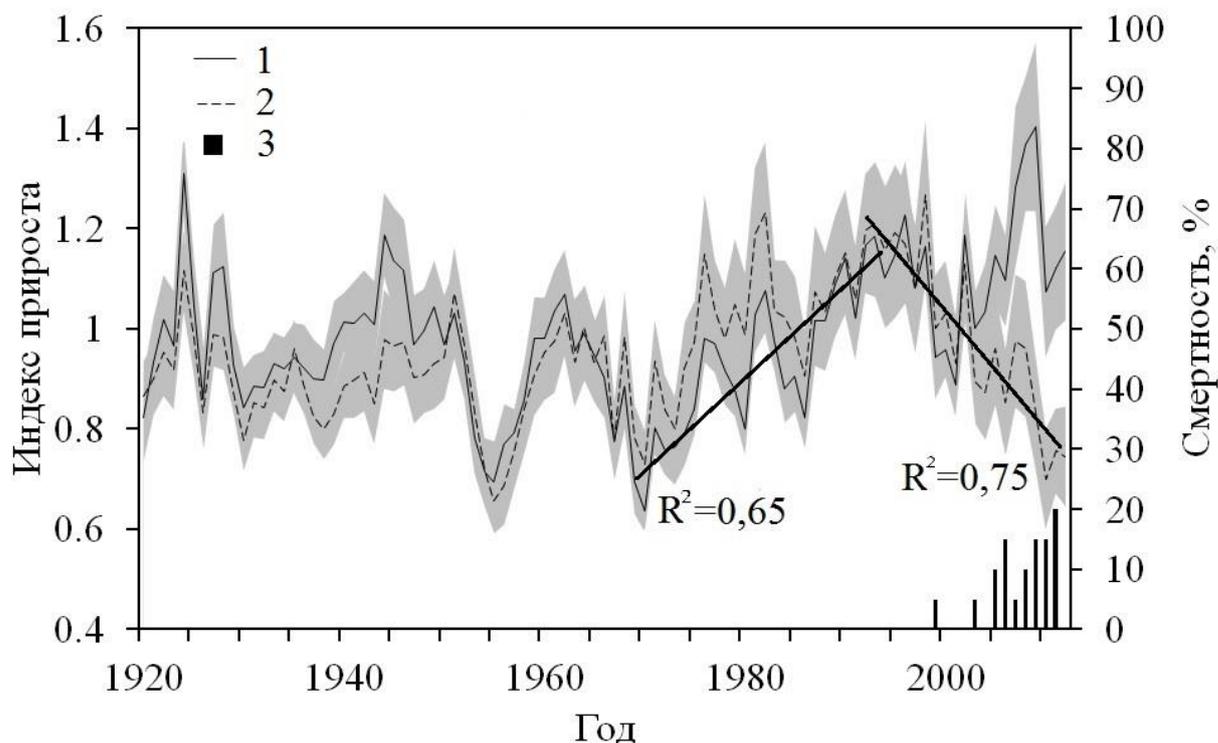


Рис. 5. Стандартизированная древесно-кольцевая хронология для «выживших» (1) и «усыхающих» (2) деревьев *Pinus sibirica*, (серый фон – доверительный интервал,  $p < 0.05$ ), черные столбцы (3) – процент мертвых деревьев, усохших в соответствующий год. Тренды значимы при  $p < 0.01$ .

### Анализ хронологий *Abies sibirica* зоны усыхания темнохвойной тайги гор Восточного Саяна

Хронологии пихты Восточного Саяна также расходятся после засухи 1998 года, однако падение прироста у обеих групп наблюдается уже с 1980-х. Вместе с тем возрастает смертность в группе «усыхающих», в то время как группа «выживших» частично восстанавливает прирост. Кроме того, деревья группы «усыхающих» становятся нечувствительными к климатическим параметрам после 2000 года и постепенно отмирают. Отпад группы «усыхающих» частично объясняет увеличение прироста «выживших» за счет снижения конкуренции. Анализ хронологии выявил похожие события, вызванные засухой в начале XX века. Выживший после этой засухи подрост сформировал древостой, который в свою очередь подвергся влиянию засухи в конце XX века. Анализируя прирост подростка, можно предположить, что подобные усыхания являются циклическим процессом. Об этом также говорит период угнетения древостоя до начала XX века. В аналогичных исследованиях для территории Дальнего Востока также отмечается, что подрост практически не подвергается негативному воздействию засух (Манько и др., 1998).

Наблюдается связь прироста с показателями SPEI мая-августа предыдущего года ( $r^2=0,37$  для когорты «усыхающих» и  $r^2=0,36$  для когорты «выживших») и упругости водяного пара мая-августа текущего года ( $r^2=0,51$

для когорты «усыхающих» и  $r^2=0,49$  для когорты «выживших»), при этом период значимых корреляций для когорты «усыхающих» наступает и заканчивается раньше, чем для когорты «выживших».

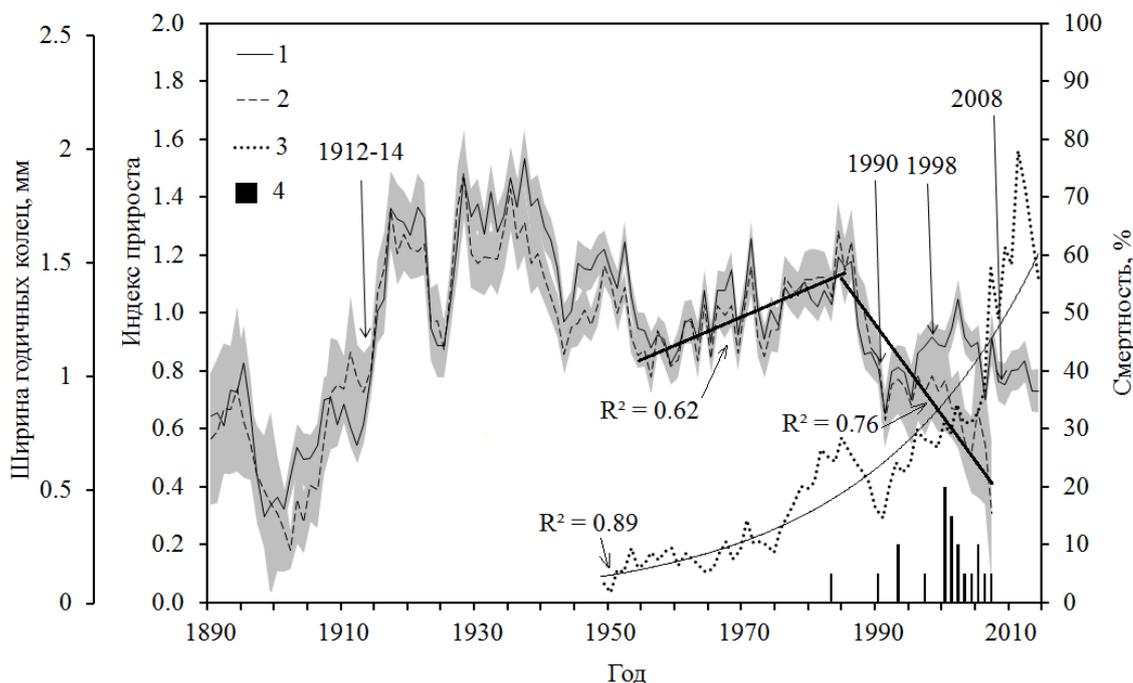


Рис. 6. Стандартизированная древесно-кольцевая хронология для «выживших» (1) и «усыхающих» (2) деревьев *Abies sibirica*, (серый фон – доверительный интервал,  $p < 0.05$ ), 3 – прирост подроста, мм, 4 – процент мертвых деревьев, усохших в соответствующий год. Стрелки указывают на даты основных засух. Тренды значимы при  $p < 0.01$ .

Влияние показателей атмосферного увлажнения, возможно, объясняется высоким индексом листовой поверхности исследуемых видов. Высокий индекс листовой поверхности пихты и кедра является одной из главных составляющих водного баланса растений. Древостой, состоящие из пихты и кедра, имеют индекс листовой поверхности 12-18, в то время как индекс листовой поверхности засухоустойчивых видов (например, лиственницы) колеблется в пределах 5-11 (Уткин, 1975). В связи с высоким индексом листовой поверхности деревья кедра и пихты особо остро реагируют на возникновение атмосферных засух, что выражается в достаточно сильной связи с показателями упругости водяного пара и SPEI.

#### **Анализ хронологий *Pinus sibirica* зоны усыхания темнохвойной тайги хребта Хамар-Дабан**

Для сравнения реакции темнохвойных древостоев на изменения климата был проанализирован радиальный прирост деревьев *Pinus sibirica*, произрастающих в зонах усыхания темнохвойной тайги хребта Хамар-Дабан. Синхронный для обеих когорт спад прироста фиксируется с середины 1980-х, далее после засухи 2003 года, сильно повлиявшей на прирост, происходит

разделение на «выжившие» и «усыхающие» деревья (рис. 7). Тренды падения прироста и индекса сухости проявляются в один период и обладают синхронностью.

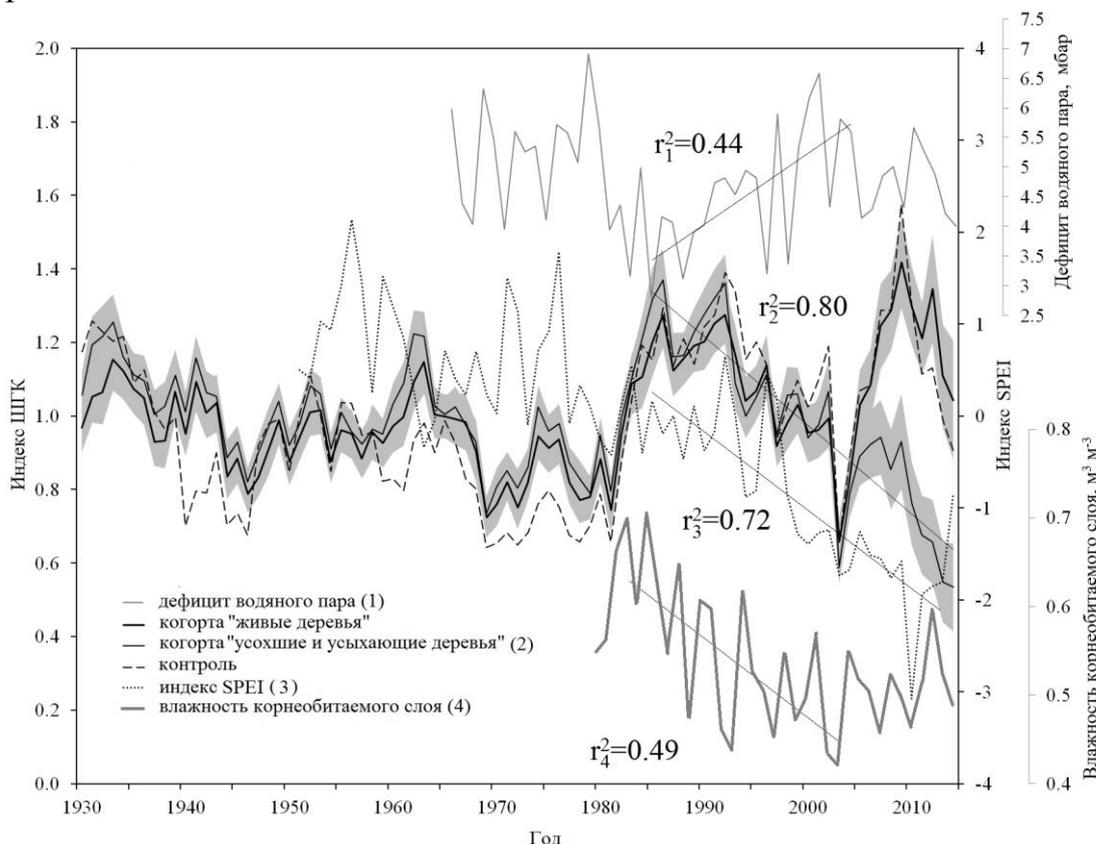


Рис. 7. Динамика древесно-кольцевых хронологий *Pinus sibirica*, SPEI, дефицита водяного пара и влажности корнеобитаемой зоны. Тренды значимы при  $p < 0.01$ .

Индекс прироста кедр когорты «усыхающих» деревьев и индекс сухости SPEI за вегетационный период связаны значимой корреляционной зависимостью ( $r=0.89$ ); при этом в июне наблюдается максимум засушливости (минимум SPEI). Корреляционная связь индексов прироста с температурой июня ниже ( $r=-0.64$ ) и носит отрицательный характер. Радиальный прирост «усыхающих» деревьев значимо коррелирует с влажностью корнеобитаемой зоны ( $r=0.62$ ) и дефицитом водяного пара ( $r=-0.57$ ). Значимые корреляции наблюдаются также с влажностью корнеобитаемой зоны ( $r=0.76$ ), а также осадками ( $r=0.46$ ) июля предыдущего года. Стоит отметить, что период, когда зафиксировано увеличение уровня коэффициента корреляции с температурой и SPEI, соответствует периоду, в котором проявляется отрицательный тренд радиального прироста и показателя SPEI. И именно в этот период июнь становится самым засушливым месяцем. На фоне климатических изменений (уменьшение атмосферного увлажнения), а также под влиянием антропогенной нагрузки в лесах Прибайкалья отмечается обострение хронического течения бактериальных заболеваний хвойных (Воронин и др., 2013).

## ВЫВОДЫ

- В экотоне горной лесотундры Алтае-Саянского региона происходит увеличение радиального прироста *Pinus sibirica* (35-140%), *Larix sibirica* (35%), *Abies sibirica* (60-210%), коррелирующее с потеплением, начавшимся в 1970-х гг., а также наблюдается продвижение верхней границы леса и возрастание численности древесных растений. Скорость продвижения лиственницы в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау оценивается величиной 1м/10 лет, продвижение сосны сибирской кедровой в лесотундре Западного Саяна составляет 2м/10лет.

- На прирост древесных растений в экотоне горной лесотундры Алтае-Саянского региона оказывают положительное влияние температуры холодного (ноябрь-март,  $r=0,27\dots 0,76$ ) и тёплого (май-август  $r=0,24\dots 0,54$ ) периодов, а также продолжительность солнечного сияния в начале периода вегетации ( $r=0,27\dots 0,56$ ); осадки оказывают преимущественно отрицательное влияние на радиальный прирост ( $r=-0,30\dots -0,45$ ).

- Радиальный прирост усыхающих деревьев *Pinus sibirica* темнохвойной тайги Кузнецкого Алатау, а также *Abies sibirica* Восточного Саяна коррелирует с показателями атмосферного увлажнения (упругость водяного пара –  $r=0,64\dots 0,80$ ; SPEI –  $r=0,65\dots 0,61$ ). Радиальный прирост усыхающих деревьев *Pinus sibirica*, произрастающих на хребте Хамар-Дабан, коррелирует с показателями атмосферного увлажнения (дефицит водяного пара –  $r=-0,57$ ; SPEI –  $r=0,89$ ) и влажности корнеобитаемого слоя ( $r=0,76\dots 0,62$ ). Усыхание темнохвойных древостоев обусловлено синергизмом эколого-климатических факторов (водный стресс, возрастание аридности климата, периодические засухи) и биотических воздействий (стволовые вредители, корневые фитопатогены, бактериальные заболевания).

### Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК

- Kharuk, V.I. Siberian pine decline and mortality in southern Siberian mountains / V.I. Kharuk, S.T. Im, P.A. Oskorbin, **I.A. Petrov**, K.J.Ranson // Forest Ecology and Management. – 2013. – 310. – p. 312–332
- **Петров, И.А.** Реакция хвойных экотона альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау на изменение климата / **И.А. Петров**, В.И. Харук, М.Л. Двинская, С.Т. Им. // Сиб. экол. журн. – 2015. - № 4. - С. 518–527
- Kharuk, V.I. Climate-induced larch growth response within Central Siberian permafrost zone / V.I. Kharuk, K.J.Ranson, S.T. Im, **I.A. Petrov** // Environmental Research Letters. – 10. - 2015. - DOI:10.1088/1748-9326/10/12/125009.
- Харук, В.И. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья / В.И. Харук, С.Т. Им, **И.А. Петров**, М.Н. Ягунов // Сиб. экол. журн. – 2016. - № 5. - С. 750–760

### В других изданиях

- Шушпанов, А. С. Динамика древостоев в экотоне альпийской лесотундры Западного Саяна / А.С. Шушпанов, **И.А. Петров**, В.И. Харук // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы II Междунар. науч. конференция, 22–25 сентября 2015, г. Красноярск - науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – с. 354-357
- Харук, В. И. Усыхание темнохвойных Прибайкалья / В.И. Харук, **И.А. Петров**, С.Т. Им // Защита лесов от вредителей и болезней: научные основы, методы и технологии. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием (Иркутск – Танхой, 14 сентября 2015 г.). – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. – с. 27-31
- Харук, В. И. Динамика аномалий водной массы и состояние древостоев южной части бассейна оз. Байкал / В.И. Харук, С.Т. Им, А.С. Голуков, **И.А. Петров** // Экосистемы Центральной Азии в современных условиях социально-экономического развития: Материалы Международной конференции. Том 2. Улан-Батор (Монголия), 8-11 сентября 2015 г. – Улан-Батор, 2015. – с. 210-214
- Голуков, А.С. Гравиметрическая съемка GRACE в индикации усыхания древостоев / А.С. Голуков, С.Т. Им, В.И. Харук, **И.А. Петров** // Тез. XIII Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН. - Москва, 2015.
- **Петров, И.А.** Изменение морфологии хвойных экотона альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау под влиянием климата / И.А. Петров // Тезисы докладов III (XI) Международной Ботанической Конференции молодых ученых в Санкт-Петербурге 4–9 октября 2015 года. СПб.: БИН РАН. - 2015. - с. 62
- **Петров, И.А.** Влияние климата на прирост *Larix sibirica* Ledeb., *Pinus sibirica* du Tour и *Abies sibirica* Ledeb. в горах Кузнецкого Алатау / И.А. Петров // Лесные биогеоценозы бореальной зоны: география, структура, функции, динамика: Материалы Всерос.Науч.Конф. - ред.коллегия: Ю.Н.Баранчиков (и др.); Сиб. отд-ние Рос.акад.наук, Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. - 2014.- с. 460.
- **Петров, И.А.** Сравнительный дендроклиматический анализ роста деревьев *Pinus sibirica* du Tour, *Abies sibirica* Ledeb. и *Larix sibirica* Ledeb. высокогорий Кузнецкого Алатау / И.А. Петров // Интеграция ботанических исследований и образования: традиции и перспективы : тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 125-летию каф. ботаники (Томск, 12-15 нояб. 2013 г.). - Томск, 2013. - С. 150-151.