

*На правах рукописи*



Кирдянов Александр Викторович

**РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ ХВОЙНЫХ  
В ЛЕСОТУНДРЕ И СЕВЕРНОЙ ТАЙГЕ СРЕДНЕЙ СИБИРИ.  
РОЛЬ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

03.02.08 – Экология (биология)  
(биологические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора биологических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в лаборатории структуры древесных колец федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН и лаборатории биогеохимии экосистем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный консультант: доктор биологических наук, профессор, академик РАН  
**Ваганов Евгений Александрович**

Официальные оппоненты: **Воронин Виктор Иванович**  
доктор биологических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, директор

**Исаев Александр Петрович**  
доктор биологических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория флористики, геоботаники и мерзлотного лесоведения, главный научный сотрудник

**Арефьев Станислав Павлович**  
доктор биологических наук, Институт проблем освоения Севера Сибирского отделения Российской Академии наук – структурное подразделение ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, сектор биоразнообразия и динамики природных комплексов, заведующий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «23» марта 2018 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 999.119.02 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, ауд. Р8-06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте организации <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 201 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Лариса Александровна Глушченко

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В последние десятилетия существенно возросло количество научных публикаций, в которых фиксируются текущие изменения климата и окружающей среды на территории всего земного шара. Показано, что за период с 1880 по 2012 гг. наблюдается рост глобально усредненной температуры поверхности суши и океана, рассчитанной на основе линейного тренда, на  $0.85^{\circ}\text{C}$  ( $0,65\text{--}1,06^{\circ}\text{C}$ ) (МГЭИК, 2014). Помимо этого, произошло сокращение запасов снега и льда, а уровень моря повысился (МГЭИК, 2014). Отмечается, что темпы изменений климата, наблюдаемые на протяжении последних десятилетий, не имеют аналогов для временных интервалов до нескольких тысячелетий (Stocker et al., 2013).

В настоящее время изменения климата уже привели к значительным трансформациям в составе и динамике растительных сообществ (Gottfried et al., 2012; Vellend et al., 2017), а также сдвигам границ ареалов различных видов растений (Grabherr et al., 1994; Dobbertin et al., 2005), включая продвижение северной и высотной границ их распространения (Харук и др., 2004, 2006; Моисеев 2011; Payette, 2007; Esper, Schweingruber, 2004; Holtmeier, Broll, 2007; Devi et al., 2008; Hagedorn et al., 2014). Указанные изменения в наибольшей степени проявляются в регионах, где экосистемы чувствительны к влиянию тех или иных климатических факторов и сами климатические изменения наиболее выражены. Одним из таких регионов является северо-восток Евразии (северные регионы Сибири), где рост растительности лимитируется температурой, и для которого в течение последних десятилетий отмечается наибольшая скорость роста температуры (Груза и др., 2014, 2015). Кроме того, поскольку именно для высоких широт северного полушария прогнозируется наиболее высокие темпы потепления (МГЭИК, 2014; IPCC, 2013), то это предполагает значительную ответную реакцию всех компонентов экосистем, в том числе древесной растительности. Соответственно, территория северной Сибири, находящаяся в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты (Brown et al., 2001; Kotlyakov, Khromova, 2002), является одним из ключевых регионов для изучения влияния факторов внешней среды и климатических изменений на рост и продуктивность лесных экосистем.

Среди наиболее действенных методов оценки темпов изменений в экосистемах является мониторинг их состояния на длительных промежутках времени. Древесная растительность выступает в качестве надежного источника информации об условиях среды и природных процессов в прошлом, поскольку эта

информация регистрируется в изменчивости целого набора параметров годовых колец деревьев и может сохраняться достаточно длительное время (Шиятов, 1986; Ваганов и др., 1996; Fritts, 1976; Schweingruber, 1988; Dendroclimatology ..., 2011).

Работы по получению и анализу древесно-кольцевых хронологий на севере Средней Сибири были начаты в середине XX-го столетия (Ловелиус, 1970; Галазий, 1981), и к настоящему времени накоплен огромный фактический материал для большого числа участков в зоне притундровых лесов и подзоны северной тайги региона (Ваганов и др., 1996; Панюшкина и др., 1997; Schweingruber et al., 1996; Sidorova et al., 2009, 2010; Esper et al., 2010; Hellmann et al., 2016 и др.). Для имеющихся древесно-кольцевых хронологий проведена определенная работа по изучению реакции радиального прироста на воздействие различных факторов внешней среды. Однако до недавнего времени большинство из этих работ было сконцентрировано, в основном, на дендроклиматическом аспекте. Например, была проведена реконструкция температурных условий за периоды от несколько сотен лет до нескольких тысяч лет (Ваганов и др., 1996; Наурзбаев, Ваганов, 1999; Naurzbaev et al., 2002). Исследования с использованием нескольких параметров древесных колец расширили границы дендроклиматического анализа (Sidorova et al., 2010; Vyrukhanova et al., 2015), но были проведены лишь для отдельных участков этого региона. Таким образом, до настоящего времени отсутствует целостная картина, позволяющая выявить наиболее важные факторы внешней среды, определяющие прирост стволовой биомассы для огромной территории зоны притундровых лесов и подзоны северной тайги Средней Сибири.

**Цели и задачи работы.** Целью работы являлось выявление факторов внешней среды, определяющих изменчивость параметров структуры древесных колец и их изотопного состава у хвойных в лесотундре и северной тайге Средней Сибири.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Обновить и расширить сеть дендроклиматического и дендрозкологического мониторинга для лесотундры и подзоны северной тайги Средней Сибири посредством построения древесно-кольцевых серий для новых участков и получения данных для характеристик структуры годовых колец хвойных.
2. Провести сравнительный анализ изменчивости параметров годовых колец деревьев для различных дендрохронологических участков, выявить пространственно-временные тренды в согласованности роста деревьев и особенности климатического отклика параметров древесных колец для разных участков и районов Средней Сибири.

3. Рассмотреть возможность получения дополнительной информации об изменчивости климата и роста деревьев с использованием многопараметрического подхода к анализу структуры древесных колец и методов стандартизации древесно-кольцевых хронологий.

4. Оценить роль гидротермического режима почв для роста и формирования древесных колец лиственницы в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов в Сибири.

5. Оценить степень влияния техногенных выбросов предприятий Норильского промышленного района на радиальный прирост хвойных и динамику гибели древостоев в условиях, близких к экстремальным по температурному режиму для роста деревьев.

#### **Защищаемые положения.**

1. В условиях севера Евразии дата схода снежного покрова, зависящая от количества выпавших твердых осадков и температуры весенне-раннелетнего периода, является одним из важнейших факторов, определяющих изменчивость радиального прироста и параметров структуры древесных колец лиственницы.

2. Разделение климатического сигнала, содержащегося в изменчивости характеристик древесных колец (ширина и максимальная плотность годичных колец), позволяет получить новые данные о влиянии температуры воздуха в отдельные промежутки сезона на рост годичных колец у хвойных на севере Евразии.

3. Анализ соотношения стабильных изотопов кислорода в основных пулах воды, вовлечённых в процесс водного обеспечения деревьев, позволяет выявить особенности этого процесса в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты и определить его звенья, наиболее подверженные влиянию при уменьшении доступности воды из почвы.

4. С использованием хронологий ширины годичных колец деревьев в зоне влияния выбросов предприятий Норильского промышленного района восстановлена динамика отмирания древостоев и показаны различия в устойчивости к загрязнению двуокисью серы для лиственницы сибирской и ели сибирской.

5. Многопараметрический подход к анализу древесных колец с использованием численных характеристик профиля плотностной и клеточной структуры годичных колец деревьев, а также их изотопного состава, существенно расширяет возможности дендроклиматического и дендрозкологического мониторинга северных регионов Евразии.

**Научная новизна и теоретическая значимость.** В представленной работе обобщены результаты комплексного исследования влияния различных факторов внешней среды на рост и формирование древесных колец для обширного и труднодоступного региона северной Евразии. Впервые для территории Сибири на основе многопараметрического подхода проведен анализ изменчивости структуры и изотопного состава древесных колец, а также отклика различных параметров колец на изменения экзогенных факторов.

Благодаря предложенной методике разделения климатического сигнала, содержащегося в изменчивости ширины и максимальной плотности древесных колец, были получены новые данные о влиянии температурного режима отдельных интервалов вегетационного периода на радиальный рост древесных растений на севере Евразии.

Разработан и осуществлен эксперимент по определению особенностей водного обмена лиственницы, произрастающей в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты на севере Средней Сибири, результаты которого имеют важное значение при прогнозировании отклика роста деревьев в условиях деградации мерзлоты.

Показана роль даты схода снежного покрова для роста и формирования древесных колец хвойных на севере Евразии. Выявлены основные тенденции в изменении растительных сообществ северных территорий Евразии в связи с изменениями летней температуры и высоты снежного покрова.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования.** Данная работа выполнена с использованием обширного фактического материала, репрезентативного на пространственных шкалах от отдельного древостоя до региона. Для получения первичных данных использовалось современное, в том числе уникальное оборудование ряда российских и зарубежных научных центров. При обработке и анализе данных были применены либо стандартные, либо уникальные, но уже апробированные методики, подходы и программное обеспечение. Результаты исследования были представлены в ряде статей в ведущих, а также специализированных международных журналах, которые обеспечивают критическое рассмотрение и рецензирование публикуемых работ научной общественностью. Все вышеперечисленное, безусловно, является подтверждением обоснованности и достоверности полученных в работе результатов и сделанных выводов.

**Практическая значимость.** В ходе выполнения представленной работы проведено обновление и расширение сети дендроклиматического и дендроэкологического мониторинга для северных регионов Средней Сибири,

которая широко используется для реконструкции климатических условий в прошлом. Предложена и апробирована методика разделения климатического сигнала, содержащегося в изменчивости ширины и плотности древесных колец. Эта методика может быть использована не только для получения дополнительной информации об изменчивости климатических переменных, но и выявления особенностей формирования древесных колец (накопления стволовой биомассы) хвойных. Показана возможность использования методов дендрохронологии для определения степени воздействия техногенных эмиссий на лесные экосистемы северных регионов Сибири.

**Личный вклад автора.** Представленная работа является обобщением исследований роста и структуры древесных колец хвойных на севере Евразии, проводимых автором в течение более 20 последних лет (с 1993 года), в результате чего сформировались представления автора о влиянии факторов внешней среды на радиальный рост древесных растений в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты на севере Сибири. Сбор большей части дендрохронологического материала, его измерение, датировка и анализ проведены либо автором, либо при его непосредственном участии. Используемые в работе измерения изотопного состава проведены совместно с д.б.н. А.Н. Николаевым, к.б.н. О.В. Сидоровой и к.б.н. А.А. Кнорре. Денситометрические измерения для материала, собранного с середины 1990-ых, выполнены автором. Определение целей и задач данного исследования, подбор материала, его обработка и интерпретация полученных результатов автором выполнены самостоятельно.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований были представлены и обсуждались на 4 всероссийских научных конференциях: “Реакция растений на глобальные и региональные изменения природной среды” (Иркутск, 2000); “Дендрохронология: достижения и перспективы” (Красноярск, 2003); “Новые методы в дендрэкологии” (Иркутск, 2007); «Эколого-географические аспекты лесообразовательного процесса» (Красноярск, 2009).

Также результаты были представлены на 18 международных конференциях: “Modelling of Tree-Ring Development - Cell Structure and Environment” (Freiburg, Germany, 1994); “Эколого-физиологические аспекты ксилогенеза хвойных” (Красноярск, 1996); First IGBP PAGES Open Science Meeting “Past Global Changes and their Significance for the Future” (London, UK, 1998); IUFRO Interdivisional Symposium “Larix-98: World Resources for Breeding, Resistance and Utilization” (Krasnoyarsk, 1998); XXI IUFRO World Congress “Forests and Society: The Role of Research” (Kuala Lumpur, Malaysia, 2000); 6<sup>th</sup> International Conference on

Dendrochronology “Tree Rings and People” (Davos, Switzerland, 2001); “Climate change and their impact on boreal and temperate forests” (Ekaterinburg, Russia, 2006); 7th International Conference on Dendrochronology “Cultural Diversity, Environmental Variability” (Beijing, China, 2006); “Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology” (Freiburg, Germany, 2010); 8<sup>th</sup> International Conference on Dendrochronology (Rovaniemi, Finland, 2010); IBFRA conference “Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Actions” (Krasnoyarsk, Russia, 2011); DENDROSYMPOSIUM 2012 “TRACE: Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology” (Potsdam and Eberswalde, Germany, 2012); “The impact of climate change on forests and agricultural ecosystems and adaptation strategies” (Krasnoyarsk, Russia, 2012); International ZOTTO workshop on “The response of northern Eurasian ecosystems to global climate change: from observations to forecasting” (Krasnoyarsk, Russia, 2013); International Symposium on Wood Structure in Plant Biology and Ecology (WSE) (Naples, Italy, 2013); Международная дендрохронологическая конференция «РусДендро-2014» (Иссык-Куль, Кыргызстан, 2014); International Scientific Conference on Dendrochronology EURODENDRO2015 (Antalya, Turkey, 2015); 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2016 (Albena, Bulgaria, 2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, из которых 29 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК для докторских диссертаций. Две работы представляют собой главы в коллективных монографиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Текст работы изложен на 284 страницах и иллюстрирован 25 таблицами и 75 рисунками. Список использованной литературы содержит 332 источника, из которых 231 работа на иностранных языках.

**Благодарности.** Всемерная помощь и содействие работе на всех ее этапах были оказаны академиком РАН Е.А. Вагановым, благодаря ценным советам и замечаниям которого стало возможным провести эти исследования.

Особую признательность автор выражает коллегам и соавторам к.б.н. А.А. Кнорре, к.б.н. А.С. Прокушкину, к.б.н. М.В. Брюхановой, к.б.н. О.В. Чураковой (Сидоровой), д.т.н. В.В. Шишову, д.б.н. П.П. Силкину, к.б.н. И.П. Панюшкиной, д.б.н. А.Н. Николаеву, проф. М. Hughes за помощь в сборе материалов и его обработке, а также за помощь в интерпретации полученных результатов. Картографический материал предоставил к.т.н. А.М. Корец. Часть денситометрических данных, используемых в работе, стала доступна благодаря

проф. F.H. Schweingruber (WSL, Швейцария). Измерения соотношения изотопного состава были проведены благодаря поддержке Dr. R. Siegwolf и Dr. M. Saurer из института Пауля Шеррера (PSI, Швейцария).

За помощь в проведении полевых работах автор выражает благодарность сотрудникам Эвенкийского опорно-экспедиционного пункта ИЛ СО РАН (пос. Тура) В.М. Боровикову, С.П. Тенишеву, Н.В. Михалеву.

Работа проведена при финансовой поддержке проектов РФФИ (96-04-48258, 07-04-00293, 11-04-91153-ГФЕН, 12-04-00542), РФФИ-ККФН (05-04-97706 «Енисей»), РНФ (14-14-00295 и 14-14-00219), Швейцарского научного фонда (SNSF SCOPES), а также поддержана в рамках государственного задания "Наука будущего" (проект № 5.3508.2017/4.6).

## **Глава 1. ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ ДЕРЕВЬЕВ И ЕГО СТРУКТУРУ**

Представлен краткий обзор литературы о влиянии факторов внешней среды на радиальный прирост и структуру древесных колец деревьев. На примере данных, приведенных в российских и зарубежных публикациях, рассмотрены вопросы о влиянии на рост древесных растений физико-географических (климат, рельеф местности, высота над уровнем моря), почвенных (гидротермический режим и состав почв, доступность элементов питания) и погодных (ход температуры, внутрисезонное распределение осадков) факторов.

Леса зоны притундровых лесов и подзоны северной тайги Средней Сибири являются идеальным объектом для изучения влияния целого комплекса факторов внешней среды на рост деревьев, поскольку эти леса находятся в зоне распространения многолетней мерзлоты и произрастают в условиях жесткого лимитирования температурой и доступности некоторых элементов питания. Это определяет их чрезвычайную уязвимость к изменениям климата, которые, как предполагается, будут проявляться в наибольшей степени, в том числе, и на данной территории (IPCC, 2013). Анализ публикаций для территории лесотундры и подзоны северной тайги Средней Сибири показал, что для рассматриваемого региона проведена большая работа по получению древесно-кольцевых хронологий и изучению реакции радиального прироста на воздействие различных факторов внешней среды. Однако в большинстве из этих работ изучалось, в основном, влияние температуры на радиальный прирост деревьев. Таким образом, до настоящего времени отсутствует целостная картина, позволяющая выявить факторы внешней среды, в наибольшей степени влияющие на прирост ствольной

биомассы в пределах обширной территории зоны притундровых лесов и подзоны северной тайги Средней Сибири, что и определило цели и задачи данного исследования.

## Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проводится анализ изменчивости параметров древесных колец хвойных, произрастающих на 53 участках на севере Евразии (Рисунок 1). Были проанализированы данные для широкого спектра местообитаний, различающихся по условиям произрастания деревьев в регионах, представляющих типичные ландшафты севера Евразии: в зоне притундровых лесов и подзоне северной тайги. Изучаемая территория находится в зоне распространения многолетнемерзлых почв (Поздняков, 1986). Лесная растительность этого региона представлена низкопродуктивными лесами, имеющими огромное средообразующее значение (Коротков, 1991; Абаимов и др. 1997).

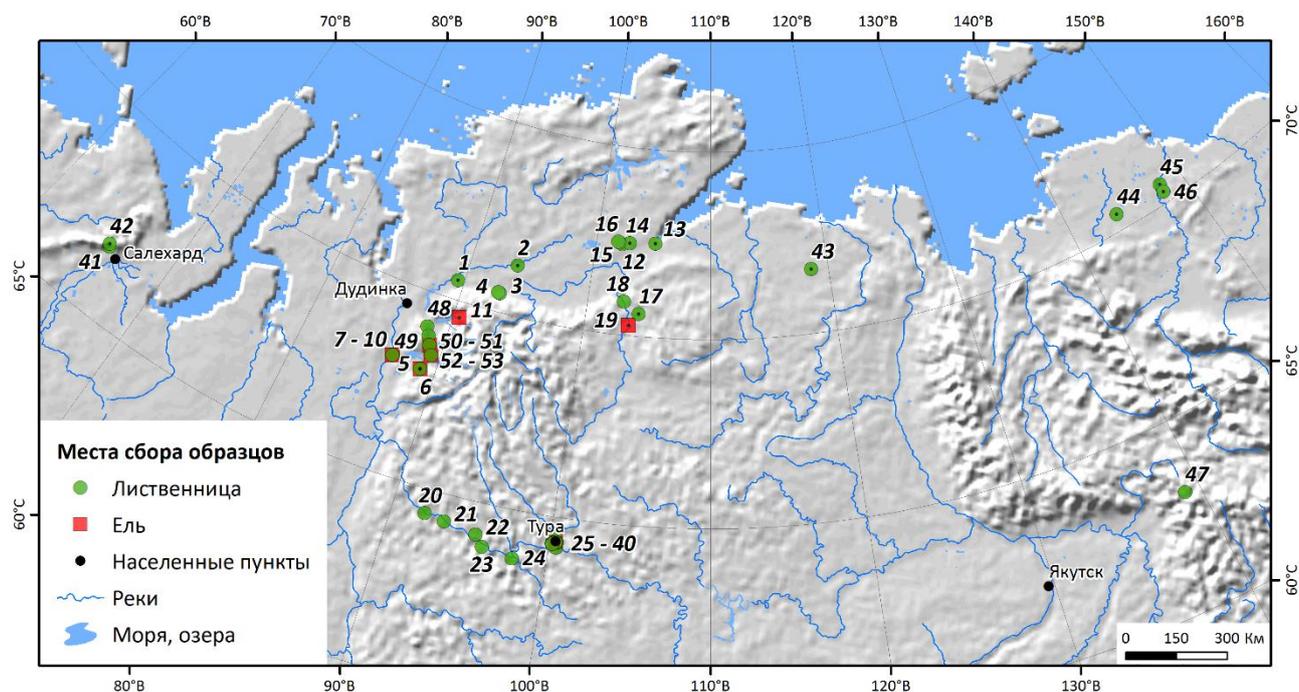


Рисунок 1. Карта-схема расположения дендрохронологических участков

В качестве объекта исследования использованы древесно-кольцевые хронологии по ширине (ШГК, все местообитания) и максимальной плотности поздней древесины (МАКС, 28 участков) годовичных колец для лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb), лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr), лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb). Для отдельных участков исследовались данные по клеточной

структуре (4 местообитания), изотопному (3 участка) и элементному (1 участок) составу древесных колец. Основное внимание в исследовании уделяется анализу дендрохронологического материала, полученного для территории севера Средней Сибири (участки 1-40 и 48-53). Данные для других регионов Евразии позволяют проверить полученные для Средней Сибири результаты и выявить пространственные закономерности вдоль градиента континентальности на севере Евразии.

Качество полученных обобщенных хронологий оценивалось при помощи набора основных дендрохронологических и статистических характеристик: количество и средняя длительность ( $\pm$  стандартное отклонение) индивидуальных серий, использованных для построения обобщенных хронологий, а также количество серий для общего периода с 1935 по 1990 гг., средняя величина дендрохронологического параметра ( $\pm$  стандартное отклонение), средний коэффициент автокорреляции 1-го порядка ( $AC(1)$ ), коэффициент чувствительности, отношение величины сигнала к шуму (SNR), средний коэффициент межсерийной корреляции ( $R_{bar}$ ) и выраженный популяционный сигнал (EPS) (Wigley et al., 1984; *Methods of Dendrochronology...*, 1990).

Сравнение обобщенных хронологий для разных участков между собой проводилось на основе коэффициентов корреляции, которые отражают тесноту связи и сходства погодичных колебаний величины параметров структуры годичных колец в пределах выделенных регионов. Также рассчитывались попарные коэффициенты корреляции для общего для всех хронологий периода (1935-1990 гг.) и скользящие коэффициенты корреляции, которые позволяли проследить за динамикой согласованности изменений радиального прироста во времени.

Для характеристики влияния климата на радиальный прирост деревьев рассчитывались коэффициенты корреляции между обобщенными хронологиями параметров структуры годичных колец деревьев и среднемесячными, а также сезонными данными для некоторых климатических переменных: температура и осадки (Fritts, 1976; Schweingruber, 1988, 1996). При расчетах были использованы многолетние среднемесячные и ежедневные данные для метеорологических станций, наиболее близкорасположенных к дендрохронологическим участкам. В некоторых случаях использовались метеорологические переменные, интерполированные для точек географической сети с разрешением  $0.5^\circ$  на  $0.5^\circ$  (CRU TS, Climatic Research Unit gridded time-series dataset, Harris et al., 2014).

Описание проведенных экспериментов и нестандартных методик анализа данных представлено в соответствующих главах работы. Расчеты проводились в статистическом пакете программ STATISTICA (Version 10, StatSoft Inc.).

### **Глава 3. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВЕСНЫХ КОЛЕЦ ХВОЙНЫХ НА СЕВЕРЕ СИБИРИ**

Анализ статистических параметров временных серий ШГК и МАКС свидетельствуют о том, что все хронологии по ширине и максимальной плотности древесных колец лиственницы и ели, полученные для лесотундры и подзоны северной тайги Средней Сибири, являются репрезентативными для древостоев и могут быть использованы при проведении дендроклиматических и дендроэкологических исследований. Временные серии, как минимум, чувствительны к изменениям факторов внешней среды (коэффициент чувствительности ШГК для общего периода 1935-1990 гг. составляет до 0.61), а высокие значения среднего межсерийного коэффициента корреляции (до 0.73 в случае МАКС) и такого параметра, как выраженный популяционный сигнал (EPS лишь в одном случае ниже 0.85) для хронологий всех исследуемых участков свидетельствуют о наличии в изменчивости ширины древесных колец общего для всех деревьев каждого из участков внешнего сигнала.

Чтобы выяснить, является ли этот внешний сигнал общим для разных участков, проводился сравнительный корреляционный анализ стандартизированных обобщенных хронологий, полученных для разных местообитаний. Расчеты проводились для трех ранее выделенных дендрохронологических районов в Средней Сибири (Ваганов и др. 1996; Панюшкина 1996, 1997; Esper et al. 2010; Hellmann et al. 2016): восточный и западный секторы лесотундры и подзона северной тайги. Попарные коэффициенты корреляции между рядами ШГК (и МАКС) для каждого из районов за общий период с 1935 по 1990 гг. свидетельствуют о высокой согласованности погодичных изменений характеристик колец. Наблюдается тенденция ослабления связей по мере увеличения расстояния между участками, которая является характерной для дендрохронологических рядов (Fritts, 1976; Schweingruber, 1988; Cook et al., 1994; Esper et al., 2010; Hellmann et al., 2016; Shestakova et al., 2016). Связи между хронологиями лиственницы и ели ниже, чем у деревьев одного вида. Для подзоны северной тайги Средней Сибири гораздо большее значение помимо расстояния между участками имеют условия конкретных местообитаний.

Результаты дендроклиматического анализа хронологий ШГК лиственницы и ели для участков в лесотундре Средней Сибири (Рисунок 2А) хорошо согласуются с данными, ранее полученными для региона (Ваганов и др., 1996; Briffa et al., 1998, 2002; Esper et al., 2010 и др.). Радиальный прирост хвойных значимо ( $p < 0.05$ ) коррелирует с температурой июня и/или июля, причем корреляция с рядами температуры, усредненными для июня-июля (Т6-7) и с июня по август (Т6-8), обычно возрастает по сравнению с корреляцией с температурой отдельных месяцев, достигая 0.74. Для хронологий МАКС характерно наличие статистически значимых ( $p < 0.05$ ) связей с температурой более продолжительного периода с июня по август (Рисунок 2Б). Коэффициенты корреляции с сезонными температурами также выше и достигают значений 0.80.

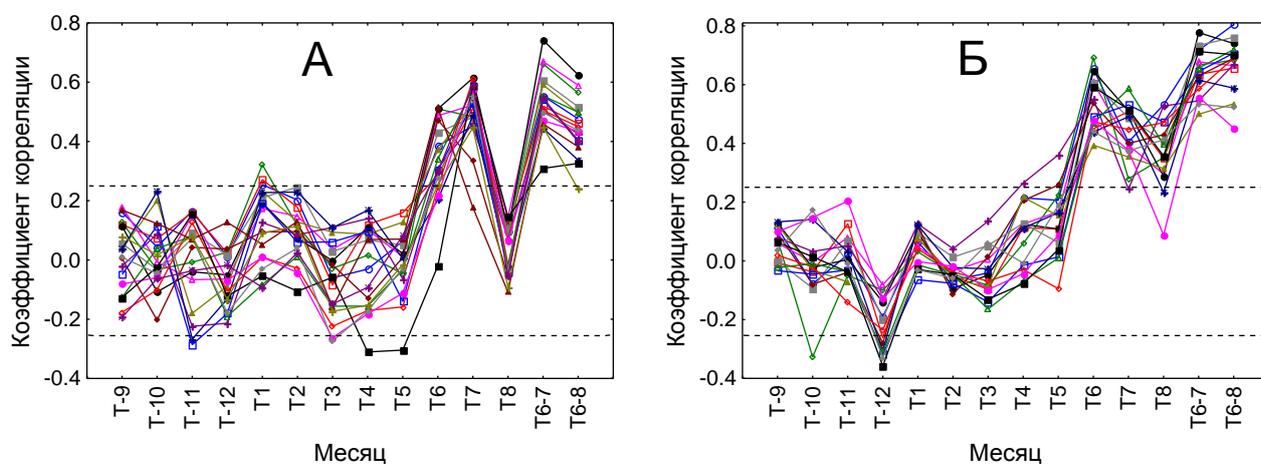


Рисунок 2. Коэффициенты корреляции хронологий ШГК (А) и МАКС (Б) лиственницы и ели в лесотундре Средней Сибири с температурой ближайших метеорологических станций

В подзоне северной тайги благодаря более благоприятному температурному режиму рост древесных колец начинается раньше, что находит отражение в значимых корреляциях хронологий ШГК с температурой июня (Рисунок 3А), которые изменяются в широких пределах от 0.28 до 0.67. Кроме того, для 6 из 15 временных серий ШГК лиственницы наблюдается отрицательная связь с температурой марта и/или апреля, что вероятно обусловлено негативным влиянием заморозков, следующими за ранней оттепелью в указанные месяцы. Отклик МАКС (Рисунок 3Б) на изменения температуры достаточно существенно различается для разных участков, что свидетельствует о меньшей информативности данного параметра по сравнению с лесотундрой, а также возрастании роли локальных условий при переходе к подзоне северной тайги.

Связи хронологий ШГК и МАКС деревьев в лесотундре и подзоне северной тайги с осадками значительно слабее, чем с температурой.

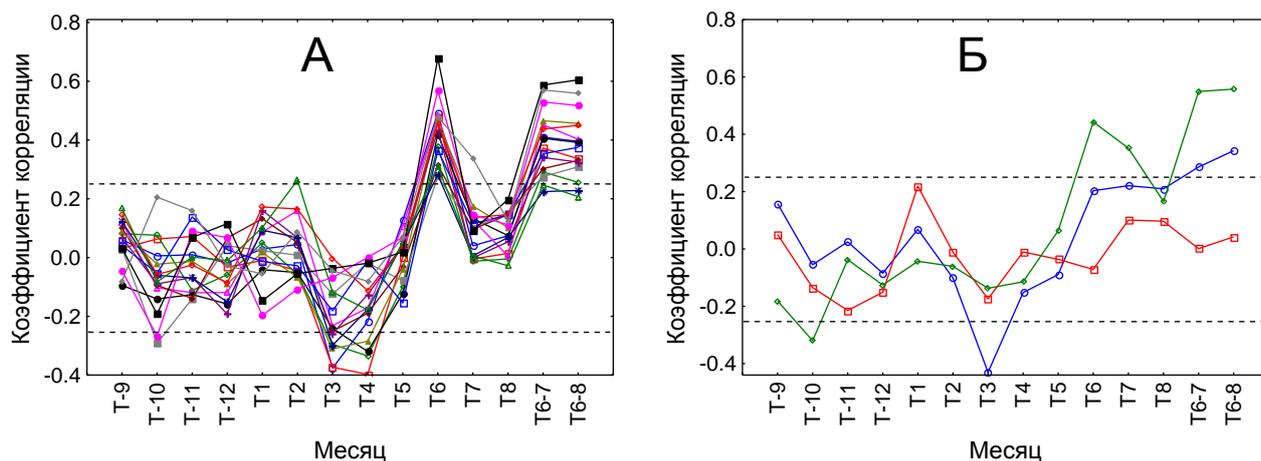


Рисунок 3. Коэффициенты корреляции хронологий ШГК (А) и МАКС (Б) лиственницы и ели в подзоне северной тайги Средней Сибири с температурой метеорологической станции Тура

Изотопные хронологии ( $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ) способны предоставить дополнительную информацию о факторах, влияющих на рост и химический состав древесных колец. Например, хронология  $\delta^{13}\text{C}$  лиственницы Каяндера в Восточной Сибири является единственным параметром, показывающим статистически значимую ( $r=0.44$ ,  $p<0.001$ ) зависимость от осадков (июля). Поскольку композитная хронология ШГК+МАКС этого участка содержит сильный температурный сигнал для сезона роста ( $r=0.67$ ), то совместный анализ нескольких параметров древесных колец, включая их изотопный состав, значительно расширяет возможности дендроклиматического анализа.

Расчеты скользящих межсерийных коэффициентов корреляции (для 30-летних периодов, со сдвигом в 1 год, для периода с 1890 по 2000-2008 годы) для всех имеющихся хронологий ШГК региона позволили установить, насколько устойчивыми являются связи обобщенных хронологий друг с другом во времени. Четко фиксируется усиление корреляционных связей хронологий ШГК региона с начала 1980-ых годов (тренд статистически значим при  $p<0.01$ ) (Рисунок 4). Подобная тенденция наблюдается и для каждого из видов хвойных в отдельности. Таким образом, на севере Средней Сибири уровень синхронности радиального прироста деревьев разных видов на участках, находящихся на расстоянии до нескольких сотен километров, в последние десятилетия достигает уровня, который характерен для деревьев одного древостоя. Это, безусловно, предполагает увеличение влияния внешних факторов, синхронизирующих прирост деревьев на всей рассматриваемой территории, и роль которых становится все более преобладающей по сравнению с влиянием локальных факторов.

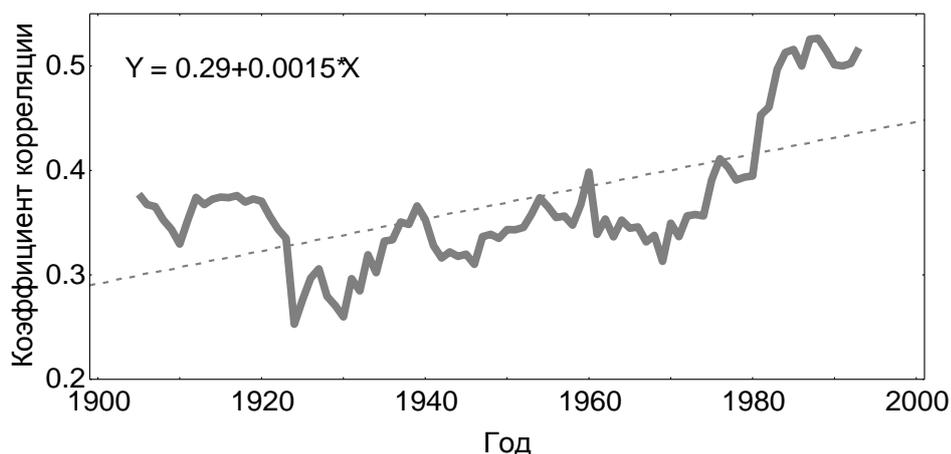


Рисунок 4. Скользящий средний коэффициент межсерийной корреляции для хронологий ШГК севера Средней Сибири

Расчет скользящих коэффициентов корреляции генерализированной хронологии, полученной в результате усреднения всех анализируемых обобщенных временных рядов ШГК на севере Средней Сибири, с рядами климатических переменных, определяющими изменчивость прироста деревьев на изучаемой территории, свидетельствует о постепенном уменьшении влияния температуры июня и июня-июля на прирост хвойных. Вклад погодичных изменений температуры апреля в определение изменчивости радиального прироста хвойных наоборот постепенно возрастает в течение XX и начале XXI столетий, становясь значимым при  $p < 0.01$  с 1988 года. Механизмы влияния температуры летних месяцев и апреля на радиальный прирост хвойных различны, но они позволяют объяснить увеличение согласованности радиального прироста у деревьев региона, которое по времени совпадает с началом периода роста температуры июня, июня-июля и апреля, а также ее изменчивости в 1980-90-ые годы.

#### **Глава 4. РОЛЬ РАННЕЛЕТНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАТЫ СХОДА СНЕЖНОГО ПОКРОВА ДЛЯ РОСТА И ФОРМИРОВАНИЯ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ**

Дата начала камбиальной активности в высоких широтах влияет на продолжительность периода продуцирования древесины (Mikola, 1962; Брюханова и др., 2013), а изменения температуры начала сезона роста даже на  $0.5^{\circ}\text{C}$  приводит к существенному сдвигу начальной даты камбиальной активности (Leikola 1969; Moser et al., 2010). С целью выявления роли даты схода снежного покрова и раннелетней температуры для роста древесных колец проведен анализ

древесно-кольцевых хронологий для 6 пробных площадей на северной границе распространения лиственницы в Евразии (Рисунок 5).

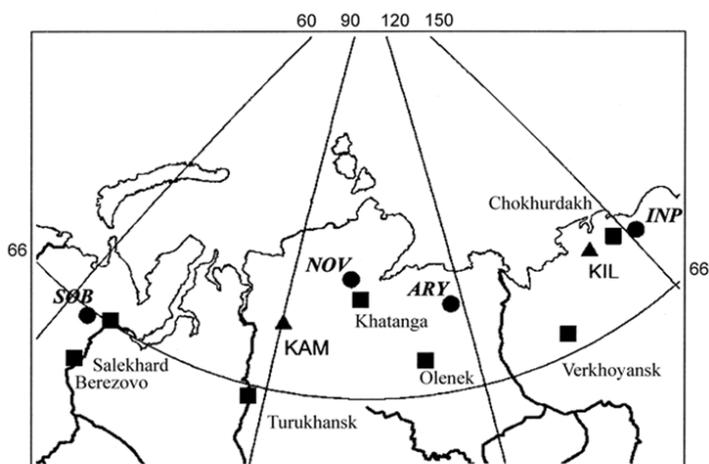


Рисунок 5. Карта-схема расположения участков с дендрохронологическими данными (круг – только ширина древесных колец, треугольник – ширина и данные по структуре колец) и метеорологических станций (прямоугольник)

Корреляционный анализ хронологий ШГК с температурой пятидневок ближайших метеорологических станций показывает, что температура лишь непродолжительных периодов самого начала сезона роста значимо влияет на радиальный прирост: 4 пятидневки (17 июня – 6 июля) на Полярном Урале (участок SOB), 5 пятидневок (17 июня – 6 июля) в Средней Сибири (NOV и ARY) и 7 пятидневок (7 июня – 11 июля) в Восточной Сибири (INP). Эти временные интервалы соответствуют периоду роста температуры. Температура отдельных периодов начала сезона роста также оказывает значимое влияние на изменчивость большинства параметров древесных колец участков KAM (Средняя Сибирь) и KIL (Восточная Сибирь) (Рисунок 6).

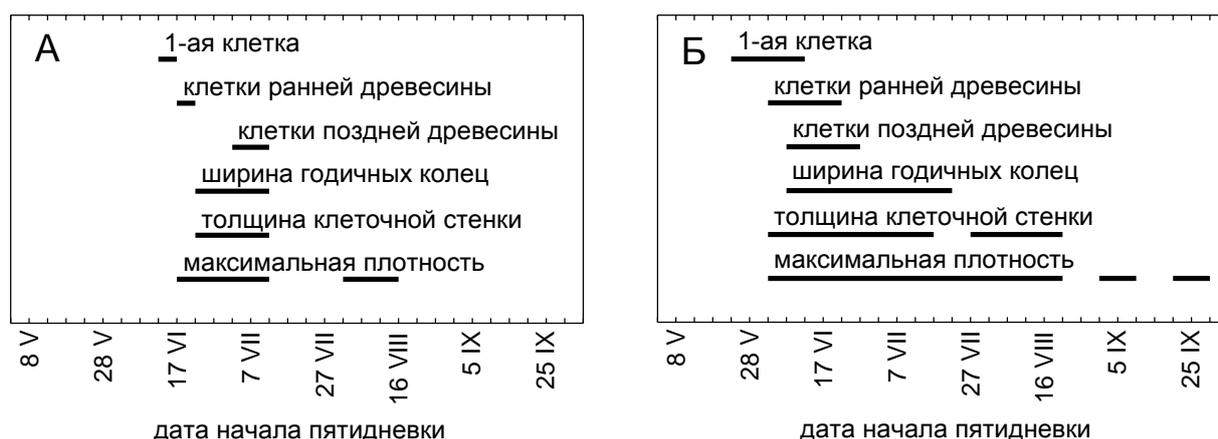


Рисунок 6. Периоды со значимой корреляцией параметров древесных колец с температурой пятидневок участка KAM в Средней Сибири (А) и KIL в Восточной Сибири (Б)

Наблюдается сдвиг наиболее важных временных интервалов с точки зрения влияния температуры на радиальные размеры трахеид различных зон древесных

колец. Максимальная плотность поздней древесины показывает статистически значимые корреляционные связи с температурой пятидневок наиболее длительного периода, причем для участка в Восточной Сибири он охватывает практически весь интервал с температурой выше 0°C.

Сезонная динамика температуры характеризуется достаточно большими различиями из года в год. Для того, чтобы учесть сдвиг начала вегетационного периода, был проведен расчет корреляционных связей параметров колец с температурой пятидневок, для которых дата начала расчета является фиксированной относительно даты инициации камбия. В качестве последней была принята дата схода снежного покрова, поскольку температура почвы является важным фактором для роста древесных растений на мерзлотных почвах (Поздняков, 1986; Николаев и др., 2011 и др.). Необходимо отметить, что различия в датах схода снежного покрова для разных лет могут составлять более 40 дней. Например, по данным для м/с Чокурдах снег полностью сошел 12 мая в 1949 г., а в 1982 г. только 23 июня.

Результаты корреляционного анализа с температурой пятидневок, фиксированными относительно даты схода снежного покрова (Рисунок 7), лучше соответствуют данным о сезонном формировании древесных колец хвойных. Температура отдельных периодов сезона роста определяет темпы продукции клеток и их размеры на стадии деления в камбиальной зоне, а для максимальной плотности древесных колец важным является температурный режим периода фотосинтетической активности, а также интервала, когда происходит утолщение вторичной клеточной стенки.

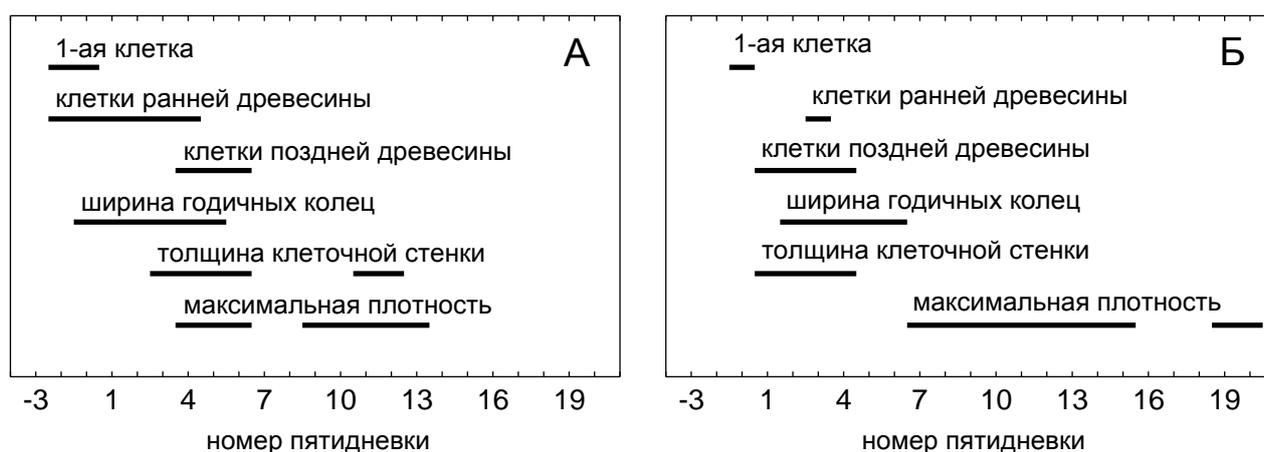


Рисунок 7. Периоды со значимой корреляцией между температурой пятидневок, рассчитанными относительно даты схода снежного покрова, и параметрами древесных колец для участка КАМ в Средней Сибири (А) и КИЛ в Восточной Сибири (Б)

Сравнительный анализ средних значений ШГК для лет с ранними и поздними датами схода снежного покрова (Таблица 1) также подтверждает влияние снежного покрова и даты его таяния на конечную ширину древесных колец, свидетельствуя о формировании более широких колец в годы с ранним сходом снежного покрова.

Таблица 1. Индексы ширины древесных колец для лет с ранними и поздними датами схода снежного покрова

Регион	Ранний сход снега			Поздний сход снега		
	Н лет	Среднее	Стандартное отклонение	Н лет	Среднее	Стандартное отклонение
Т	12	1.25	± 0.19	10	0.88	± 0.25
И	9	1.06	± 0.28	9	0.92	± 0.22

Примечание: Т – Таймыр, Средняя Сибирь, И – Индигирка, Восточная Сибирь

Анализ климатических данных для северных регионов Евразии показал, что в направлении с запада на восток происходит увеличение скорости роста поздневесенней-раннелетней температуры, а также уменьшение количества осадков зимнего периода, что ведет к более раннему таянию снежного покрова и, следовательно, активации камбия при более низких температурах на востоке. Это объясняет различие в температуре первой пятидневки, для которой наблюдается значимая положительная корреляция с шириной древесных колец участков, расположенных на Полярном Урале (10°C), в Средней (6-7°C) и Восточной (4°C) Сибири.

При помощи моделирования индексов радиального прироста деревьев на трех участках на севере Евразии показано, что принятие в расчет даты схода снежного покрова может помочь в объяснении феномена потери чувствительности радиального прироста и максимальной плотности годовых колец деревьев высоких широт к изменениям летней температуры, наблюдаемого после 1960-ых годов (Briffa et al., 1998). Увеличение количества зимних осадков может быть одной из причин возникновения различий в ходе летней температуры и древесно-кольцевых хронологий, поскольку приводит к более позднему таянию снежного покрова, что вызывает задержку процессов реактивации камбия и формирование более узких колец.

В результате оценки пространственно-временной динамики структуры лесных экосистем для высотного трансекта на плато Путорана выявлено, что раннелетняя температура (а также температура летнего периода) и количество

зимних осадков и, соответственно, дата схода снежного покрова влияют на основные процессы и параметры экосистем, определяющие продуктивность лесных биогеоценозов на севере Средней Сибири, а именно, изменение площади лесов (возобновление лиственницы и выживаемость деревьев), а также изменчивость продукции стволовой древесины.

Таким образом, при изучении особенностей роста древесных растений на северной границе леса в Сибири, а также при прогнозировании отклика лесных и тундровых экосистем северных территорий на изменения климата необходимо учитывать широкий спектр климатических переменных, влияющих на темпы радиального прироста и определяющих динамику растительных сообществ, включая, в том числе, количество зимних осадков, раннелетнюю температуру и дату схода снежного покрова.

## **Глава 5. РАЗДЕЛЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, СОДЕРЖАЩЕГОСЯ В ИЗМЕНЧИВОСТИ ШИРИНЫ И ПЛОТНОСТИ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ДЕРЕВЬЕВ**

В условиях севера Евразии, где радиальный прирост деревьев и его структура зависят от изменчивости ограниченного числа внешних факторов, параметры годичных колец оказываются тесно связанными друг с другом (Ваганов, Шашкин, 2000). Соответственно, в изменчивости каждого параметра кольца помимо специфичной для него информации об изменениях внешней среды содержится сигнал, также характерный и для других показателей структуры колец. В данной главе предложена методика разделения климатического сигнала, содержащегося в изменчивости двух наиболее часто используемых в работах по дендроклиматологии для северных и высокогорных регионов Евразии параметров древесных колец. Анализируются данные по ширине и максимальной плотности годичных колец лиственницы с трех участков, расположенных на северной границе леса на Полярном Урале (ПУ), в Средней (КОТ) и Восточной Сибири (ТСНОК).

Между индивидуальными хронологиями абсолютных значений ШГК и МАКС деревьев, произрастающих в экстремальных условиях, наблюдается положительная корреляция, которая значима ( $p < 0.05$ ) в 100% случаев для ТСНОК и КОТ и 91% для ПУ. Коэффициент корреляции между обобщенными хронологиями также высок: 0.65, 0.69 и 0.60, соответственно для ПУ, КОТ и ТСНОК за период с 1900 по 1990 ( $p < 0.000001$ ). Однако связь между двумя этими параметрами кольца не является строго линейной (Рисунок 8).

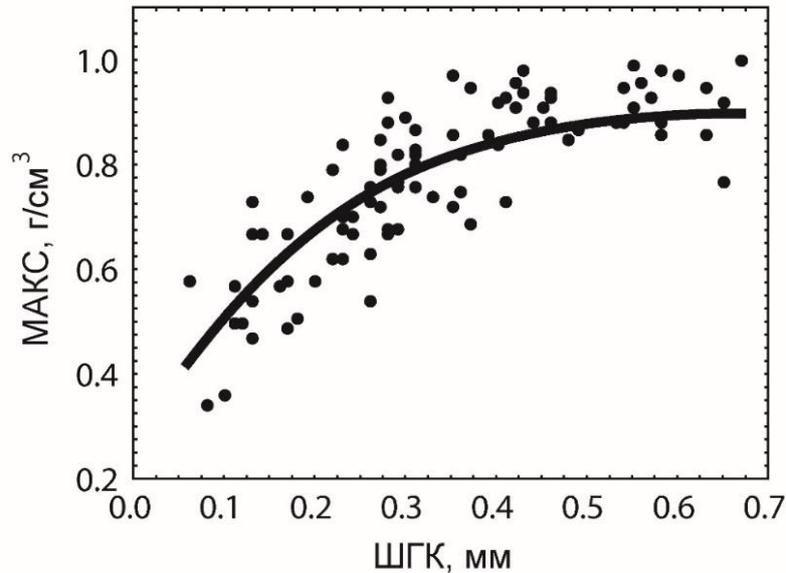


Рисунок 8. Типичный для образцов с северной границы леса график зависимости максимальной плотности поздней древесины от ширины годовичных колец для отдельного дерева и кривая в соответствии с уравнением (1), описывающая эту зависимость

Для того, чтобы исключить взаимную зависимость параметров кольца друг от друга и разделить содержащийся в их изменчивости внешний сигнал, был предложен метод индексирования индивидуальных хронологий относительно кривой, которая наилучшим способом описывает общую тенденцию изменения МАКС в связи с изменениями ШГК:

$$\text{МАКС}' = \text{МАКС}_{\text{MIN}} + (\text{МАКС}_{\text{AS}} - \text{МАКС}_{\text{MIN}}) (1 - \exp(-a \cdot \text{ШГК})) \quad (1)$$

где  $\text{МАКС}_{\text{MIN}}$  – теоретически достижимое минимальное значение плотности при практически отсутствующем годовичном приросте,  $\text{МАКС}_{\text{AS}}$  – величина максимальной плотности при достижении ШГК величин более 1 мм,  $a$  – эмпирически подбираемый коэффициент. Подбор параметров уравнения (1) ( $\text{МАКС}_{\text{MIN}}$ ,  $\text{МАКС}_{\text{AS}}$ ,  $a$ ) проводился для каждого дерева и керна в отдельности на основе метода наименьших квадратов. В результате стандартизации МАКС относительно этой кривой и усреднения индивидуальных хронологий был получены временные серии  $I_{\text{МАКС}}$  для каждого из рассматриваемых участков.

Для полученных временных серий  $I_{\text{МАКС}}$  характерен более низкий коэффициент корреляции индивидуальных хронологий с обобщенными сериями (0.66-0.71) и меньшие значения отношения величины сигнала к шуму (11.95-15.94), чем у хронологий МАКС, полученных стандартным путем (0.77-0.82 и

16.35-28.52, соответственно для рассматриваемых статистических характеристик). Значения среднего коэффициента синхронности хронологий  $I_{\text{МАКС}}$ , находящиеся в пределах от 0.92 до 0.94 для разных участков, сравнимы с данными для ШГК (0.96-0.97) и МАКС (0.94-0.97). Таким образом, в целом, новый параметр  $I_{\text{МАКС}}$  можно характеризовать как качественный дендрохронологический параметр.

Сравнительный анализ изменчивости параметров древесных колец показывает, что в результате применения предложенной методики разделения сигнала получен новый показатель структуры годичных колец деревьев  $I_{\text{МАКС}}$ , в изменчивости которого заключена дополнительная информация об условиях роста деревьев по сравнению с той, что содержится в изменениях величины их радиального прироста. Так, коэффициенты корреляции  $I_{\text{МАКС}}$  с временными сериями ШГК незначимы для всех трех участков.

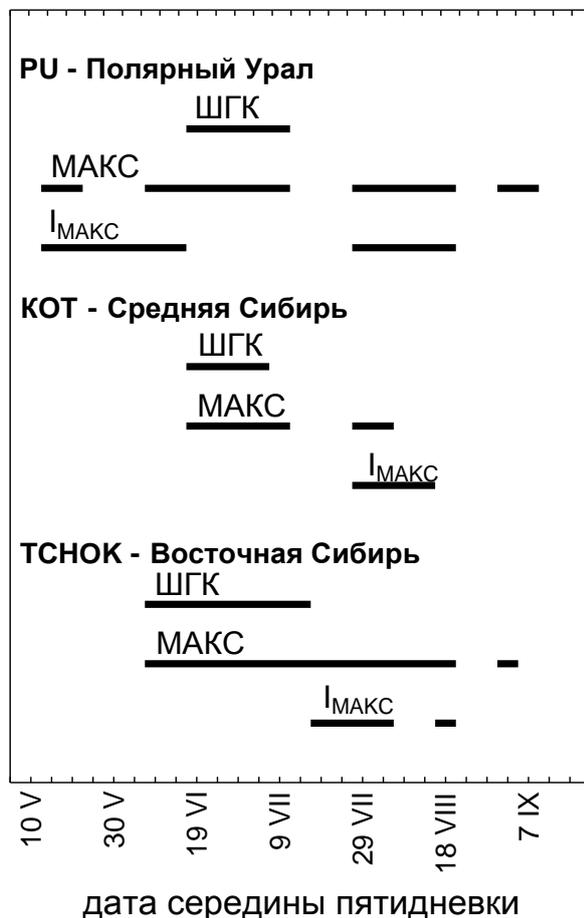


Рисунок 9. Периоды со значимой ( $p < 0.05$ ) корреляцией ширины древесных колец (ШГК), максимальной плотности поздней древесины (МАКС) и максимальной плотности поздней древесины, индексированной относительно ШГК ( $I_{\text{МАКС}}$ ), с температурой пятидневок для участков на Полярном Урале (ПУ), в Средней (КОТ) и Восточной (ТСНОК) Сибири

Анализ корреляционных связей параметров древесных колец с температурой пятидневок (Рисунок 9) свидетельствует, что для всех хронологий характерна статистически значимая ( $p < 0.05$ ) положительная корреляция с температурой отдельных интервалов летнего периода. Для ШГК наиболее

значимым оказывается влияние температуры первой половины лета. МАКС значимо связана с температурой практически всего летнего периода, тогда как для  $I_{\text{МАКС}}$  четко выявлены периоды в основном во второй половине вегетационного периода, с температурой которых проявляется статистически значимая положительная корреляция.

Полученные результаты лучше соотносятся с этапами формирования годичных колец лиственницы на северном пределе ее распространения (Ваганов, Шашкин, 2000; Vaganov et al., 2006) чем те, которые получены для плотности, обработанной стандартным способом. Максимальная плотность определяется размерами и толщиной клеточных стенок трахеид поздней древесины (Силкин, Кирдянов, 1999; Yasue et al., 2000; Silkin, Kirdeyanov, 2003), формирующихся во второй половине сезона. Период, для которого получена значимая связь  $I_{\text{МАКС}}$  с температурными условиями, соответствует по времени интервалу, когда продуцируются, дифференцируются и созревают клетки поздней древесины (Antonova, Stasova, 1997; Брюханова и др., 2013; Rossi et al., 2013). Для участка PU на Полярном Урале выявлено два периода со значимой корреляцией: один в начале сезона, а второй во второй его половине. Реакция  $I_{\text{МАКС}}$  деревьев этого участка на рост температуры в начале вегетационного периода может быть одним из адаптационных механизмов к большому количеству зимних осадков (соответственно, высокому уровню снежного покрова) в условиях теплой весны.

Коэффициенты корреляции хронологий рассматриваемых параметров годичных колец с погодичными изменениями усредненных значений температуры для периодов, для которых получены значимые коэффициенты корреляции с параметрами древесных колец (Рисунок 9), показывают, что в отличие от хронологий ШГК и МАКС, временные серии  $I_{\text{МАКС}}$  не связаны значимо с раннелетней температурой. Однако величина коэффициентов корреляции  $I_{\text{МАКС}}$  с температурой позднелетнего периода оказывается значительно выше, чем у ШГК и примерно на том же уровне, что и для МАКС на участках PU и ТСНОК ( $r=0.52-0.63$ ), но существенно возрастает для КОТ с  $r=0.32$  ( $p<0.05$ ) до  $r=0.61$  ( $p<0.001$ ). Данный результат свидетельствует, что предложенная и апробированная методика разделения климатического сигнала, содержащегося в изменчивости ШГК и МАКС, позволяет получить новый параметр, использование которого может привести к пересмотру результатов дендроклиматических реконструкций и повысить их качество для отдельных периодов сезона роста.

В целом, полученные результаты показывают, что при изучении отклика прироста и структуры годичных колец деревьев на климатические изменения на северной границе распространения древесной растительности необходимо не

только принимать во внимание различные факторы внешней среды, но и учитывать связи между отдельными параметрами годовых колец древесины.

## **Глава 6. РОЛЬ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОЧВ**

Ранее было показано, что у деревьев разных местообитаний в пределах одного дендроклиматического района могут наблюдаться существенные различия в изменчивости параметров радиального прироста и их климатического отклика. Очевидно, что эти различия определяются условиями местообитаний, и почвенные условия играют здесь главенствующую роль. Для того, чтобы выявить роль гидротермического режима многолетнемерзлых почв для роста и формирования годовых колец деревьев, было проведено исследование особенностей радиального прироста лиственницы для трех участков, заложенных вдоль достаточно короткого (длиной около 100 м) трансекта в подзоне северной тайги Средней Сибири (Таблица 2): участок RB на береговой кромке р. Кочечум, участок RZ в долине временного водотока, и участок TER на террасе. Перепад высот составлял не более 2 метров.

Несмотря на близость участков, различия в их расположении в элементах рельефа, а также в живом напочвенном покрове привели к большим различиям гидротермического режима почв между местообитаниями (Таблица 2): глубина деятельного слоя и влажность почвы различается в разы между участками в течение всего вегетационного периода. В результате, почвенные условия участка на береговой кромке RB можно охарактеризовать как сухие и теплые, участка RZ – холодные и переувлажненные, а на участке TER как занимающие промежуточное положение.

Хотя деревья имеют примерно одинаковый возраст, продуктивность их стволовой биомассы существенно различается на трех рассматриваемых участках (Таблица 2). Деревья на участке RZ характеризуются наименьшей величиной апикального и радиального прироста, отставая практически в два раза по этим показателям от соседних участков. Результаты однофакторного дисперсионного анализа (one-way ANOVA) свидетельствуют, что ШГК на участке RZ значимо ( $p < 0.000001$ ) отличается по величине от прироста деревьев на двух других участках RB и TER, средняя ширина древесных колец на которых статистически значимо не различается ( $p = 0.38$ ).

Таблица 2. Описание участков и параметры древостоев

Участок	RB	RZ	TER
Рельеф местности	Береговая кромка	Долина временного водотока	Пойменная терраса
Толщина слоя живого напочвенного покрова ± стандартное отклонение, см	3±2	20±10	11±4
Глубина деятельного слоя почвы ± стандартное отклонение			
в начале вегетационного периода*, см	54±15	0±0	19±10
в конце вегетационного периода*, см	150±14	39±10	48±10
Влажность почвы корнеобитаемого слоя			
в начале вегетационного периода*, %	56	224	57
в конце вегетационного периода*, %	31	81	31
Средняя высота деревьев, м	17	9	20
Средний диаметр на высоте 1.3 м, см	22	10	16
Средняя ШГК ± стандартное отклонение, мм	1.94±0.82	0.77±0.36	1.84±0.63

Примечание: \* обозначает данные, усредненные для двух сезонов. Измерения для начала вегетационного периода были проведены в первой половине июня, конца вегетационного периода измерения – в конце августа или начале сентября. Влажность почвы рассчитана как количество воды, отнесенное к весу сухой почвы

Для двух участков RB и TER четко проявляются негативные тренды абсолютных значений ШГК с увеличением возраста деревьев (Рисунок 10), причем эта тенденция наблюдается для всех деревьев этих участков. ШГК на RZ, наоборот, увеличивается с возрастом, и эта тенденция проявляется для большинства деревьев на участке (12 из 18, или 67%).

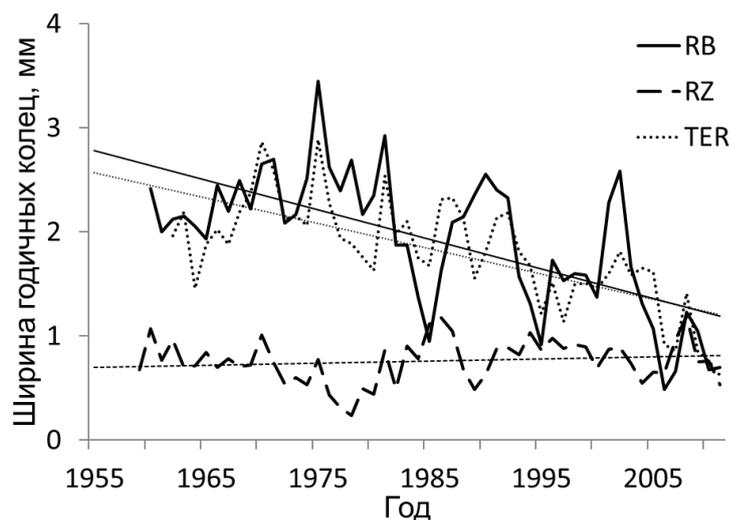


Рисунок 10. Обобщенные хронологии радиального прироста трех расположенных вблизи друг от друга участков в подзоне северной тайги Средней Сибири

Результаты дендроклиматического анализа свидетельствуют, что, хотя радиальный прирост на всех участках в основном определяется климатическими условиями предыдущего года, функции климатического отклика существенно различаются между участками. Для участка RB, условия на котором можно охарактеризовать как засушливые вследствие большей инсоляции, прирост деревьев положительно связан с количеством осадков и отрицательно коррелирует с температурой. Противоположный результат получен для участка RZ, хронология ШГК которого отрицательно связана с осадками и положительно с температурой, поскольку почвенные условия для деревьев здесь определяют избыток воды и недостаток тепла. Это указывает на новые возможности для дендроклиматических исследований в регионе, в связи с тем, что при тщательном подборе местообитаний существует вероятность провести реконструкцию различных климатических переменных, основываясь на данных для деревьев из разных условий.

Приведенные результаты являются свидетельством того, что радиальный прирост, его динамика и климатический отклик у деревьев лиственницы на трех близкорасположенных участках в подзоне северной тайги Средней Сибири зависят от гидротермического режима почв, поскольку температура и влажность воздуха одинаковы для таких коротких расстояний. Данный вывод подтверждается зависимостью средней ширины древесных колец лиственницы от глубины сезонно-талого слоя, наблюдаемой для лиственничников различных типов на севере Средней Сибири (Кирдянов и др., 2006), а также фактом увеличения радиального прироста деревьев рассматриваемого региона после прохождения беглого низового пожара (Арбатская, 1998; Sofronov, Volokitina, 2010), ведущего к уничтожению теплоизолирующего напочвенного покрова и, как следствие, увеличению глубины сезонно-талого слоя до 1.5-2 м (Абаимов и др. 2001).

Еще одним доказательством значимости гидротермического режима почв для роста деревьев в зоне распространения многолетней мерзлоты на севере Сибири, являются результаты изучения особенностей водного режима лиственницы на двух участках в подзоне северной тайги Средней Сибири: TuraL (64° 17' с.ш., 100° 12' в.д., 140 м н.у.м.) и TuraH (64° 21' с.ш., 100° 25', 611 м н.у.м.). Для местообитаний характерна различная температура воздуха и динамика сезонного оттаивания деятельного горизонта почвы, а также сроки начала и длительность вегетационного периода, что привело к формированию древостоев с разной продуктивностью стволовой биомассы.

Сезонный ход температуры существенно различался в течение вегетационных периодов 2011 и 2012 годов. Так, средняя температура мая в 2011 году более чем на 3°C выше, чем в 2012, а для второй половины мая этот показатель составляет 6.3°C. Различия в динамике температуры в начале вегетационного периода 2011 и 2012 годов обусловили более позднее оттаивание почвы и существенное отставание (около 2 недель), а также меньшую скорость ростовых процессов лиственницы в 2012 году. Помимо этого, в период с 1 мая по 31 августа в 2011 году выпало 148% (253 мм) осадков, а в 2012 лишь 50% (85 мм) от среднего многолетнего значения. В целом, средняя температура летнего периода в 2012 году (15.1°C) была лишь ненамного выше, чем в 2011 году (14.8°C), но среднемесячная температура июля 2012 года была значительно выше (15.9°C в 2011 и 19.6°C в 2012), характеризуя этот год как засушливый.

Изотопный состав кислорода воды был определен для образцов корней, ветвей и хвои, а также подстилки и почвы на разной глубине с интервалом 5-10 см от поверхности до мерзлого горизонта (Рисунок 11) для 5 деревьев на каждом из участков. Образцы отбирались 4-5 раз за сезон.



Рисунок 11. Снимки, демонстрирующие отбор проб почвы на участке TuraL 17 августа 2012 года (слева) и пример ветви, используемой для отбора хвои и древесины (дерево №4, участок TuraL, дата сбора 29 мая 2011 г.) (справа). Фотографии Кирдянова А.В.

Для того, чтобы понять, из каких слоев почвы деревья получают воду в первую очередь в разные периоды сезона роста, был проведен корреляционный анализ между изотопными данными для воды в корнях и почве из разных по

глубине слоев. Коэффициент корреляции был статистически значим ( $p < 0.01$ ) для значений  $\delta^{18}\text{O}$  для воды почвы на поверхности минерального слоя ( $r^2 = 0.55$ ). Для глубин 5, 10 и 15 см были получены наиболее высокие коэффициенты корреляции ( $r^2 = 0.72, 0.77$  и  $0.71$ ). Для больших глубин корреляционная связь начинает снижаться:  $r^2 = 0.59$  для 20 см, и становится статистически незначимым для еще больших глубин. Получены также высокие коэффициенты корреляции для изотопного состава в лесной подстилке. Таким образом, наиболее тесная связь обнаружена для воды в почве на глубине 10 см, что подтверждается также наименьшим сдвигом регрессионной прямой от линейного уравнения ( $-1.89\%$ ), которое описывало бы соотношение между изотопным сигналом воды в почве и корнях как 1:1. Подобные, но меньшие по величине связи были получены для значений  $\delta^{18}\text{O}$  при расчетах для воды в почве и ветвях.

Для того, чтобы определить роль воды из почвы на разной глубине для деревьев, была применена модель разделения смешенного сигнала из двух источников

$$\delta_{\text{root}} = f_{\text{top}} \cdot \delta_{\text{top}} + (1 - f_{\text{top}}) \cdot \delta_{\text{low}}, \quad (2)$$

где  $\delta_{\text{root}}$  – измеренная величина  $\delta^{18}\text{O}$  для воды корней,  $\delta_{\text{top}}$  и  $\delta_{\text{low}}$  – соотношение изотопов кислорода в воде верхних (средняя величина для глубин от 0 до 15 см, включая данные для лесной подстилки) и более глубоких слоев почвы, соответственно,  $f_{\text{top}}$  – доля воды из верхнего горизонта в корнях деревьев (Dawson et al., 2002). Были проведены 500 повторных расчетов вероятного вклада от каждого источника и с учетом нормального распределения величин, исходя из их измеренных средних значений и стандартных отклонений для  $\delta_{\text{root}}$ ,  $\delta_{\text{top}}$  и  $\delta_{\text{low}}$  (Phillips, Gregg, 2001). Модель позволяет выделить долю воды, поглощаемую корнями из верхних слоев почвы  $f_{\text{top}}$ , (до 15 см).

Полученные распределения значений вероятности поглощения воды из верхних слоев почвы (Рисунок 12) свидетельствуют, что летом 2011 года на участке TuraL преобладает поступление воды в корни именно из верхних слоев почвы. В течение более сухого вегетационного периода 2012 года возрастает роль воды из нижних слоев. Результаты для TuraH не столь очевидны с точки зрения разделения источников, что предполагает более сбалансированное использование воды деревьями как из верхних, так и нижних слоев почвы. Необходимо также отметить, что более выровненные значения для участка TuraH, могут быть связаны также и с тем, что различия изотопного состава воды из двух источников здесь не столь велики, что приводит к меньшей разрешающей способности модели

(Fry, 2013). Тем не менее, данные, представленные на Рисунках 12Б и 12Г, свидетельствуют о наличии сдвига по направлению к поглощению воды из нижних слоев почвы в большей степени в 2012 году по сравнению с 2011.

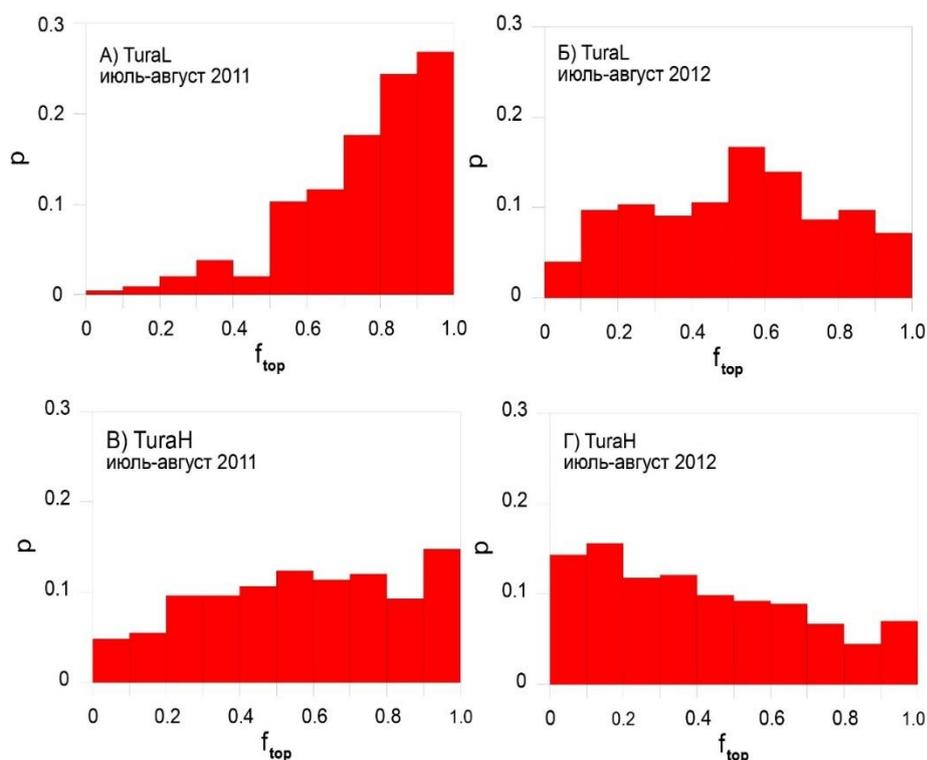


Рисунок 12. Распределение вероятности, полученное в ходе использования модели разделения смешенного сигнала из двух источников (уравнение 2), которая позволяет провести разделение источника воды для деревьев на две составляющих: вода верхних слоев (0-15 см) и нижних слоев (>15 см). Доля воды корней, впитываемая из верхних слоев почвы  $f_{top}$ , показана для участка TuraL летом 2011 (А) и 2012 (Б) годов, а также участка TuraH в 2011 (В) и 2012 (Г) годах ( $f_{top} = 1$  обозначает, что используется вода только верхних слоев почвы,  $f_{top} = 0$  соответствует исключительному использованию воды более глубоких почвенных слоев)

Сезонная амплитуда  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках в изучаемом регионе достигает значений практически в 20‰. Это может существенно влиять на изотопный состав воды, потребляемой деревьями, поскольку результат будет зависеть от того, какая именно вода доступна в данный момент для дерева: выпавшая в виде дождей летом, весной или талая вода твердых осадков. В результате эксперимента показано, что, хотя в конце вегетационного периода глубина деятельного слоя почвы может составлять 60-70 см и более, деревьями в основном используется вода поверхностных слоев почвы. Однако, это не означает, что потреблением из более глубоких горизонтов почвы или даже оттаявшего мерзлотного слоя,

которые характеризуются более отрицательными значениями  $\delta^{18}\text{O}$ , можно пренебречь. Большая доля воды из нижних слоев почвы возрастает в годы с засушливыми условиями, что подтверждается и результатами расчетов с использованием модели разделения смешенного сигнала для воды из двух источников с разным изотопным составом (Рисунок 12). Безусловно, данных только для двух участков недостаточно, чтобы сделать общие выводы, которые бы описывали особенности водного обмена деревьев бореальной зоны в целом. Тем не менее, полученные результаты хорошо согласуются с данным исследования в Восточной Сибири (Sugimoto et al., 2003) и могут помочь в объяснении негативных трендов хронологий  $\delta^{18}\text{O}$  у деревьев, произрастающих на севере Евразии, в последние десятилетия, несмотря на повышение температуры (Saurer et al., 2002).

Полученные результаты позволяют предположить, что прогнозируемые изменения климата (IPCC, 2013) и деградация мерзлоты (Delisle, 2007) могут существенно повлиять на продуктивность лесов мерзлотной зоны Сибири, что необходимо принимать во внимание при разработке и планировании лесохозяйственной деятельности для северных территорий Сибири.

## **Глава 7. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ЭМИССИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРИРОСТ И УСЫХАНИЕ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ И ЕЛИ СИБИРСКОЙ**

Помимо природных факторов внешней среды, определяющих динамику лесных, и не только, экосистем, все большую роль играют антропогенные факторы, в том числе и техногенные выбросы промышленных предприятий. На северо-западе Средней Сибири экосистемы притундровых лесов на протяжении уже более 70 лет находятся под сильным воздействием техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного района (НПР), что привело не только к нарушению устойчивости биоценозов, но и обусловило деградацию лесной растительности на территории порядка 500 тыс. га. Применение дендрохронологических методов позволяет провести оценку масштабов воздействия атмосферных выбросов на состояние лесных экосистем (Воронин, 2005; Ivshin, Shiyatov, 1996).

Для восстановления динамики гибели древостоев и определения влияния техногенных выбросов предприятий НПР на радиальный прирост деревьев проводилось изучение изменчивости ШГК лиственницы и ели на участках в бассейне р. Рыбная, подверженных воздействию выбросов в разной степени

(Корец и др. 2014). В ходе экспедиционных работ 2004 г. был осуществлен сбор древесных образцов лиственницы на участках, находящихся на удалении 22 км («Омунтах», далее – Л22), 45 км («Чопко», Л45), 68 км («Омне», Л68) и 85 км («Деличе», Л85) от г. Норильска. Древостои на участках «Омне» и «Деличе» помимо лиственницы были представлены елью, для которой также были собраны образцы (Е68 и Е85, соответственно). Всего в ходе экспедиционных работ для анализа был собран материал для 268 деревьев лиственницы сибирской (от 33 до 93 на участок) и 113 деревьев для ели сибирской (64 для Е68 и 49 для Е85). Дата гибели каждого дерева была определена с использованием метода перекрестной датировки.

Первые случаи усыхания лиственницы, связанные с воздействием техногенных выбросов предприятий НПр отмечаются в 40-е годы (Рисунок 13А). Массовая гибель деревьев начинается на трех ближайших к городу участках в середине 50-х годов прошлого столетия, а 1960-ые и 1970-ые гг. характеризуются наибольшей скоростью деградации этих древостоев (до 20% деревьев древостоя в год). К середине 1970-х гг. насаждения на участках в пределах до 70 км к юго-востоку от г. Норильска погибли полностью, тогда как на участке Л85 около 25% деревьев лиственницы оставались живыми и в 2004 году.

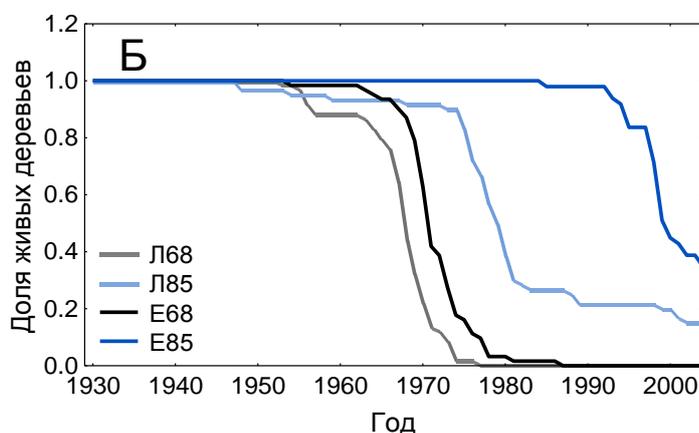
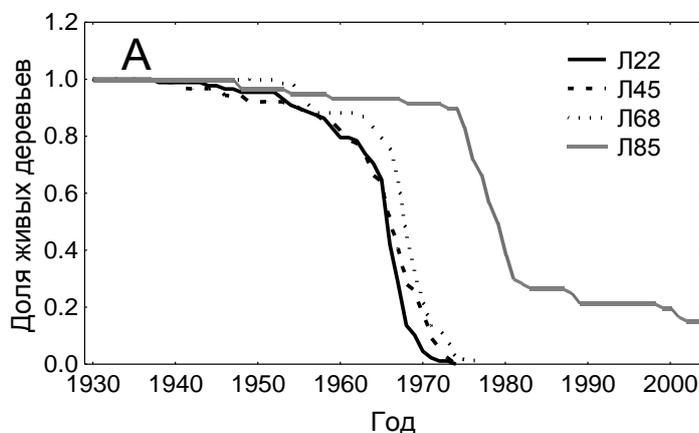


Рисунок 13. Динамика гибели деревьев лиственницы (А) и ели (Б) на участках, находящихся на разном удалении от г. Норильска. На рисунке (Б) данные для ели (сплошные линии) приведены в сравнении с данными для лиственницы (пунктирные линии). Данные нормированы относительно количества живых деревьев соответствующего вида на каждом участке в 1935 году (1=100%), но без учета соотношения количества живых и погибших деревьев на момент сбора дендрохронологического материала

Динамика гибели ели существенно отличается от таковой для лиственницы для тех же самых пробных площадей (Рисунок 13Б), показывая большую устойчивость ели к воздействию поллютантов.

Изменение скорости отмирания деревьев в окрестностях г. Норильска хорошо согласуется с динамикой антропогенной нагрузки, т.е. количеством загрязняющих веществ, производимых и выбрасываемых в атмосферу предприятиями района вследствие открытия в 1960 году Талнахского месторождения медно-никелевых руд с повышенным содержанием серы и ввода в эксплуатацию в середине 1960-х гг. новых производственных мощностей. Трехкратное увеличение объемов продукции металлов в период с 1965 по 1980 гг. сопровождалось увеличением выбросов поллютантов в атмосферу до 2.5 млн. т. в год в середине 1980-х гг.

Большую часть газообразных выбросов составляет диоксид серы, при определенных погодных условиях приводящий к выпадению кислотных дождей, поражающих хвою деревьев, и, как следствие, к существенным нарушениям фотосинтеза. Различия в устойчивости относительно мягкой хвои лиственницы и защищенной толстым слоем кутикулы хвои ели к поражающему воздействию кислотных дождей, по всей видимости, является основной причиной разной реакции этих двух видов на воздействие поллютантов. Необходимо отметить, что гибель деревьев связана не только с повторяющейся из года в год дехромацией хвои и ее опаданием в результате воздействия промышленных выбросов. Так, повреждение ассимиляционного аппарата деревьев является фактором, способствующим усилению уязвимости деревьев при вспышках размножения насекомых и к поражению грибами (Воронин, 2005). Кроме того, в экосистемах, подверженных влиянию поллютантов и, прежде всего  $SO_2$ , происходит изменение химического состава почв (Effects of Accumulation..., 1983). Была показана возможность возникновения водного дефицита (Savard et al., 2004) и недостатка элементов питания (Rautio et al., 1998) у деревьев вследствие химического ожога хвои. Все это сказывается на элементном составе древесных колец лиственницы региона (Panyushkina et al., 2016).

Анализ изменчивости радиального прироста лиственницы (Рисунок 14), подверженных воздействию техногенных эмиссий предприятий НПП и результаты дендроклиматического анализа радиального прироста хвойных в регионе (Глава 3) свидетельствуют, что еще одним фактором, влияющим на выживаемость деревьев региона, являются климатические условия, которые могут выступать в роли стрессоров и способствовать развитию негативных процессов в лесах (Воронин, 2005). Комбинированное воздействие низкой

температуры во время вегетационного периода, во многом определяющей динамику ШГК деревьев в регионе, и загрязнителей приводит к усилению стресса для древесной растительности, что обуславливает не только снижение прироста в годы с относительно холодным летом, но и невозможности ослабленных деревьев увеличить радиальный прирост в последующие относительно теплые периоды (Рисунок 14).

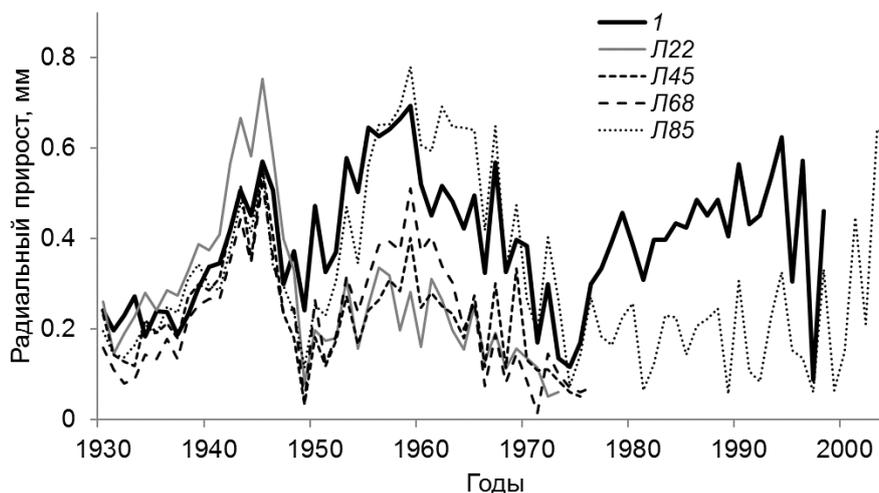


Рисунок 14. Динамика радиального прироста лиственницы на участках на разном удалении от г. Норильска в сравнении с контрольным участком (1)

Проведенные исследования продемонстрировали возможности использования дендрохронологических методов для получения ответа на целый ряд вопросов относительно масштабов воздействия загрязнителей на лесные экосистемы региона. Для дальнейшего выявления темпов и масштабов деградации лесов в пределах НПР и его окрестностях, оценки рисков распада древостоев, а также выявления процессов воздействия техногенных эмиссий предприятий на лесные экосистемы необходима организация постоянного мониторинга на возможно большей территории региона с отбором не только дендрохронологических образцов, но и всего комплекса материалов для проведения оценок текущего состояния экосистем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе рассмотрены особенности влияния нескольких факторов внешней среды на рост и формирование древесных колец лиственницы сибирской и Гмелина, а также ели сибирской, произрастающих в зоне притундровых лесов и подзоне северной тайги Средней Сибири. Также были проанализированы дендрохронологические данные и их связь с климатическими переменными для северных регионов Полярного Урала и Восточной Сибири, что

позволило выявить тренды, закономерности и особенности роста древесных растений для обширной территории северной Евразии. Для широкого круга местообитаний на севере Евразии выявлены наиболее важные экзогенные факторы, определяющие изменчивость радиального прироста, параметров его структуры и изотопного состава годовых колец хвойных: температура воздуха и количество осадков отдельных периодов в течение года (прежде всего, летняя и раннелетняя температура), дата схода и высота снежного покрова, лесные пожары, гидротермический режим многолетнемерзлых почв (динамика сезонного оттаивания мерзлоты и влажность разных почвенных горизонтов), а также воздействие техногенных выбросов предприятий. Помимо этого, с использованием данных для годовых колец древесных растений выявлены основные тенденции в динамике растительных сообществ экотона лес-тундра вдоль высотного трансекта на северо-западе плато Путорана в условиях меняющегося климата на протяжении последних десятилетий.

Безусловно, результаты этой работы нельзя рассматривать как окончательные, поскольку круг указанных в исследовании факторов внешней среды не является полным. Также нельзя заключить, что влияние каждого из факторов на продуцирование стволовой биомассы древесных растений и динамику наземных экосистем северных территорий Евразии изучено полностью. Например, в работе не рассматривались такие факторы внешней среды как ветровалы, инвазии насекомых, грибные и бактериологические заболевания, и лишь небольшой раздел работы был уделен влиянию лесных пожаров. Тем не менее было показано, что в некоторых случаях процент объясненной дисперсии изменчивости некоторых из параметров колец только одним из рассмотренных внешних факторов может превышать 60% (максимальная плотность поздней древесины и средняя температура летнего периода), а, например, воздействие техногенных выбросов предприятий г.Норильска приводит к гибели древостоев на территории в несколько сотен тысяч гектар. Важным результатом является тот факт, что для территории, для которой предполагалось, что рост растительности зависит прежде всего от летней температуры, показана роль и других экзогенных факторов. Кроме того, предложена методика разделения внешнего сигнала, содержащегося в изменчивости параметров древесных колец и показаны возможности изотопного анализа при выявлении особенностей водного режима древесных растений в зоне распространения многолетней мерзлоты. Все это, безусловно, не только расширяет возможности исследования особенностей формирования древесных колец растений для северных территорий, но и позволяет проводить реконструкцию нескольких климатических переменных и

восстанавливать динамику растительности для огромной территории на севере Евразии и для периодов до нескольких тысяч лет.

В настоящее время достаточно затруднительно провести ранжирование факторов среды по степени их значимости для роста древесных растений на севере Сибири, поскольку эти факторы имеют различный территориальный охват и действуют на разных временных интервалах, объясняя либо внутригодовые вариации параметров колец, либо их погодичную или низкочастотную (длительностью в несколько десятилетий и столетий) вариабельность. Кроме того, роль и вклад отдельных факторов в определение изменчивости радиального прироста может меняться в течение жизни одного дерева. Тем не менее, все рассмотренные факторы необходимо принимать во внимание при прогнозировании отклика растительности северных территорий на изменения климата и внешней среды.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

По итогам проведенной работы были получены следующие основные результаты и сделаны следующие выводы:

1. Основным климатическим фактором, определяющим величину и структуру радиального прироста хвойных в лесотундре Средней Сибири, является температурным режим летнего периода. При переходе от лесотундры к северной тайге уменьшается влияние температуры на рост и плотностную структуру годичных колец хвойных и возрастает роль локальных условий.
2. Разнообразие климатического отклика параметров структуры и состава годичных колец хвойных различных местообитаний на севере Средней Сибири предоставляет новые возможности для дендроклиматических исследований в регионе. При изучении особенностей влияния факторов внешней среды на рост деревьев необходимо учитывать связи между параметрами древесных колец, поскольку в изменчивости различных показателей структуры колец может содержаться схожая информация.
3. Темпы радиального прироста и структура годичных колец лиственницы в лесотундре Евразии зависят от даты схода снежного покрова, принятие в расчет которой позволяет получить более физиологически обоснованные корреляционные связи между параметрами структуры древесных колец и температурой отдельных интервалов вегетационного периода.
4. Существенное увеличение согласованности радиального прироста хвойных в лесотундре и северной тайге Средней Сибири в последние десятилетия до уровня, характерного для деревьев одного древостоя, предполагает возрастание

роли общих для всей территории внешних факторов, среди которых значительную роль играют увеличение температуры апреля и изменчивости температуры летних месяцев.

5. Гидротермический режим почв существенно влияет на величину и изменчивость радиального прироста лиственницы в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты на севере Средней Сибири. Неблагоприятные условия для функционирования корней деревьев, связанные с низкой температурой корнеобитаемого слоя и/или его переувлажнением, приводят к существенному падению продуктивности стволовой древесины.
6. Анализ данных по соотношению стабильных изотопов кислорода в основных пулах воды, вовлечённых в процесс водного обмена деревьев, свидетельствуют, что деревьями, произрастающими в зоне распространения многолетнемерзлых почв, в основном используется вода поверхностных слоев почвы (глубиной до 15 см). Роль воды из более глубоких нижних слоев возрастает в засушливые периоды, что приводит к облегчению изотопного состава кислорода в древесных кольцах.
7. Техногенные эмиссии предприятий Норильского промышленного района являются одним из основных факторов внешней среды, влияющим на устойчивость лесных экосистем и определяющим продуктивность стволовой биомассы древесного яруса в регионе. Негативное влияние низких летних температур на фоне воздействия поллютантов может привести к существенному снижению радиального прироста и дальнейшему ослаблению деревьев, инициируя тем самым ускорение гибели древостоев.
8. При изучении особенностей роста древесных растений на севере Сибири, а также при прогнозировании отклика лесных и тундровых экосистем северных территорий в ответ на изменения климата необходимо учитывать широкий спектр факторов внешней среды, влияющих на темпы радиального прироста и определяющих динамику растительных сообществ. Степень влияния каждого из этих факторов видоспецифична и может зависеть от локальных условий.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Главы монографий**

1. Ваганов, Е.А. Рост, структура годичных колец хвойных пород и реконструкция изменений климата / Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов // в «Лесные экосистемы Енисейского трансекта». – Ред. Ф.И. Плешиков, С. 181-196. – Новосибирск : Изд-во СО РАН. – 2002. – 356 с.

## **В научных изданиях, рекомендованных ВАК**

2. Кирдянов, А.В. Использование характеристик плотности древесины в дендроклиматических исследованиях / А.В. Кирдянов // Сибирский экологический журнал. – 1999 – № 2. – С. 193-201.
3. Vaganov, E.A. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia / E.A. Vaganov, M.K., Hughes, A.V. Kirilyanov, F.H. Schweingruber, P.P. Silkin // Nature. – 1999. – Vol. 400. – No. 6740. – 149-151.
4. Ваганов, Е.А. Значение раннелетней температуры и сроков схода снежного покрова для роста деревьев в субарктической зоне Сибири / Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, П.П. Силкин // Лесоведение. – 1999. – № 6. – С. 3-14.
5. Kirilyanov, A.V. The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in Siberian Subarctic / A. Kirilyanov, H. Hughes, E. Vaganov, F. Schweingruber, P. Silkin // Trees. – 2003. – Vol. 17. – P. 61-69.
6. Silkin, P.P. The relationship between variability of cell wall mass of earlywood and latewood tracheids in larch tree-rings, the rate of tree-ring growth and climatic changes / P.P. Silkin, A.V. Kirilyanov // Holzforschung. – 2003. – Vol. 57. P. 1-7.
7. Кнорре, А.А. Climatically-induced interannual variation in aboveground biomass productivity in the forest-tundra and northern taiga of central Siberia / А.А. Кнорре, А.В. Кирдянов, Е.А. Ваганов // Oecologia. – 2006. – Vol. 147. – P. 86-95.
8. Николаев А.Н. Вариации параметров годовых колец и содержание стабильных изотопов  $\delta^{13}\text{C}$  у лиственницы Каяндера в восточной Якутии / А.Н. Николаев, А.В. Кирдянов, Г.Х. Шлезер, Г. Хелле // Лесоведение. – 2006. – № 2. – С. 51-55.
9. Кнорре, А.А. 2006. Изменчивость видового разнообразия и надземной биомассы вдоль высотного северо-западной оконечности плато Путорана / А.А. Кнорре, А.В. Кирдянов, Е.В. Федотова, М.М. Наурзбаев // География и природные ресурсы. – 2006. – № 3. – С. 75-81.
10. Кирдянов, А.В. Разделение климатического сигнала, содержащегося в изменчивости ширины и максимальной плотности годовых колец древесины / А.В. Кирдянов, Е.А. Ваганов // Лесоведение. 2006. – № 6. – С. 71-75.
11. Kirilyanov, A.V. Separating the climatic signal from tree-ring width and maximum latewood density records / A.V. Kirilyanov, E.A. Vaganov, M.K. Hughes. // Trees. - 2007. – Vol. 21. – No. 1. – P. 37-44.
12. Кнорре, А.А. Изменчивость годичной продукции надземной фитомассы основных доминантов высокоширотных сообществ Центральной Сибири / А.А. Кнорре, А.В. Кирдянов, Е.А. Ваганов // Растительные ресурсы. – 2007. – 43. – 1. – С. 3-17.
13. Kirilyanov, A.V. Climate signals in tree-ring width, wood density and  $\delta^{13}\text{C}$  from larches in Eastern Siberia (Russia) / A.V. Kirilyanov, K.S. Treydte, A. Nikolaev, G. Helle, G.H. Schleser // Chemical Geology (including Isotope Geoscience). – 2008. – Vol. 252. – P. 31-41.
14. Sidorova, O.V. Do larch trees respond to a slowly developing water shortage in the North of Central Siberia? / Sidorova O.V., R.T.W. Siegwolf, M. Saurer, A.V.

- Shashkin, A.A. Knorre, A.S. Prokushkin, A.V. Kirdyanov // *Oecologia*. – 2009. – Vol. 161. – P. 825–835.
15. Esper, J. Trends and uncertainties in Siberian indicators of 20th century warming / J. Esper, D. Frank, U. Büntgen, A. Verstege, R.M. Hantemirov, A.V. Kirdyanov // *Global Change Biology*. – 2010. – Vol. 16. – P. 386-398.
  16. Vaganov E.A. Denrochronology of larch trees growing on Siberian permafrost / E.A. Vaganov, A.V. Kirdyanov. // *Permafrost Ecosystems. Siberian Larch Forests* / Eds. A. Osawa, O.A. Zyryanova, Y. Matsuura, T. Kajimoto, R.W. Wein. - *Ecological Series*, Vol. XXVI: Springer, 2010. – 347-363.
  17. Табакова, М.А. Зависимость радиального прироста лиственницы Гмелина на севере Средней Сибири от локальных условий произрастания / М.А. Табакова, А.В. Кирдянов, М.В. Брюханова, А.С. Прокушкин // *Журнал Сибирского федерального университета, Биология*. – 2011. - Т. 4. – № 4. – С. 314-324.
  18. Kirdyanov, A.V. 20th century treeline advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia / A.V. Kirdyanov, F. Hagedorn, A.A. Knorre, E.V. Fedotova, E.A. Vaganov, M.M. Naurzbaev, P.A. Moiseev, A. Rigling // *Boreas*. – 2012. – Vol. 41. – No. 1. – P. 56-67.
  19. Anchukaitis, K.J. Tree rings and volcanic cooling / K.J. Anchukaitis, P. Breitenmoser, K.R. Briffa, A. Buchwal, U. Büntgen, E.R. Cook, R.D. D'Arrigo, J. Esper, M.N. Evans, D. Frank, H. Grudd, B. Gunnarson, M.K. Hughes, A.V. Kirdyanov, C. Körner, P.J. Krusic, B. Luckman, T.M. Melvin, M.W. Salzer, A.V. Shashkin, C. Timmreck, E.A. Vaganov, R.J.S. Wilson // *Nature Geoscience*. – 2012. – Vol. 5. – No 12. – P. 836-837.
  20. Kirdyanov, A.V. 2013. Tree-ring growth of Gmelin larch under contrasting local conditions in the north of Central Siberia / A.V. Kirdyanov, A.S. Prokushkin, M.A. Tabakova // *Dendrochronologia*. – 2013. – Vol. 31. – P. 114-119.
  21. Кирдянов, А.В. Динамика усыхания лиственницы сибирской в зоне техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного район / А.В. Кирдянов, В.С. Мыглан, А.В. Пименов, А.А. Кнорре, А.К. Экарт, Е. А. Ваганов. – *Сибирский экологический журнал*. – 2014. – № 6. – С. 945-952
  22. Büntgen, U. Temperature-induced recruitment pulses of Arctic dwarf shrub communities / U. Büntgen, L. Hellmann, W. Tegel, S. Normand, I. Myers-Smith, A.V. Kirdyanov, D. Nievergelt, F.H. Schweingruber // *Journal of Ecology*. – 2015. – Vol. 103. – No. 2. – P. 489-501.
  23. Schneider, L. Revising midlatitude summer temperatures back to A.D. 600 based on a wood density network / L. Schneider, J. E. Smerdon, U. Büntgen, R. J. S. Wilson, V. S. Myglan, A. V. Kirdyanov, J. Esper // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – Vol. 42. – No. 11. – P. 4556–4562.
  24. Ovchinnikov, D. Long-term tree-ring variability in the northern Siberia and Altai Mountains, Russia / D. Ovchinnikov, L. Lyu, A. Kirdyanov // *Conference Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2015*. – STEF92 Technology Ltd., 2015. – Book 3. – Vol. II, 491-498 pp.
  25. Saurer, M. The relationship between soil and needle water oxygen isotope composition of *Larix gmelinii* in Siberia / M. Saurer, A.V. Kirdyanov, A.S.

- Prokushkin, K.T. Rinne, R.T.W. Siegwolf / *New Phytologist*. – 2016. – Vol. 209. – P. 955–964.
26. Shestakova, T.A. 2016. Forests synchronize their growth in contrasting Eurasian regions in response to climate warming / T.A. Shestakova, E. Gutiérrez, A.V. Kirilyanov, J.J. Camarero, M. Génova, A.A. Knorre, J.C. Linares, V.R. de Dios, R. Sánchez-Salguero, J. Voltas // *PNAS*. – 2016. – 113. – No. 3. – P. 662-667.
27. Shishov, V.V. VS-oscilloscope: a new tool to parameterize tree radial growth based on climate conditions / V.V. Shishov, I.I. Tychkov, M.I. Popkova, V.A. Ilyin, M.V. Bryukhanova, A.V. Kirilyanov // *Dendrochronologia*. - 2016. – Vol. 39. – P. 42-50.
28. Hellmann, L. 2016. Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest / L. Hellmann, L. Agafonov, F.C. Ljungqvist, O. Churakova (Sidorova), E. Dũthorn, J. Esper, L. Hũlsmann, A.V. Kirilyanov, P. Moiseev, V.S. Myglan, A.N. Nikolaev, F. Reinig, F.H. Schweingruber, O. Solomina, W. Tegel, U. Bũntgen. // *Environmental Research Letters*. – 2016. – Vol. 11. - Article 074021.
29. Panyushkina, I.P. Trends in elemental concentrations of tree rings from the Siberian Arctic / I.P. Panyushkina, V.V. Shishov, A.M. Grachev, A.A. Knorre, A.V. Kirilyanov, S.W. Leavitt, E.A. Vaganov, E.P. Chebykin, N.A. Zhuchenko, M.K. Hughes // *Tree-Ring Research*. – 2016. – Vol. 72. – No. 2. – P. 67–77.
30. Kirilyanov, A.V. Dendrochronological research of trees growing on permafrost in Siberia, Russia / A.V. Kirilyanov, M.V. Bryukhanova, A.A. Knorre, M.A. Tabakova, A.S. Prokushkin // *Conference Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2016*. – STEF92 Technology Ltd., 2016. – Book 3. – Vol. II. – P. 517-524.