

на правах рукописи

Мацковский Владимир Владимирович

**Долгопериодная климатическая изменчивость
в параметрах годовых колец деревьев**

Специальность 1.6.14. –
Геоморфология и палеогеография

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в лаборатории дендрохронологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт географии Российской академии наук.

Научный консультант: **Соломина Ольга Николаевна**

доктор географических наук, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт географии Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Ваганов Евгений Александрович**

доктор биологических наук, профессор, академик, научный руководитель Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Кислов Александр Викторович

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии географического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»

Субетто Дмитрий Александрович

доктор географических наук, профессор, декан факультета географии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

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

Защита диссертации состоится «23» декабря 2022 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.049.02 на базе ФГБУН Институт географии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4.

Факс: (495) 959-00-16, e-mail: d00204603@igras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Институт географии Российской академии наук и на сайте организации <http://igras.ru/defences/>.

Автореферат разослан «___» октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.г.н.



Белоновская Елена Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Дендрохронологический метод широко применяется для палеоклиматических реконструкций голоцена во всех регионах мира кроме Антарктиды. Его основное достоинство – точность датирования и связанное с этим высокое разрешение реконструкций. Кроме того, деревья и кустарники широко распространены на нашей планете, поэтому дендрохронологические реконструкции, которые уже исчисляются тысячами, имеют обширное географическое покрытие и обеспечивают пространственную детальность данных о климате прошлого. Метод перекрестного датирования, который впервые был предложен именно для годовых колец деревьев, дает возможность продлить хронологически привязанные ряды косвенных данных о климате далеко за пределы жизни отдельных деревьев. Таким образом получены серии, охватывающие существенную часть голоцена (Friedrich et al. 2004; Nicolussi et al. 2009). Многие принципиальные открытия в палеоклиматологии связаны именно с использованием дендрохронологического метода. В частности, речь идет о беспрецедентности скорости и масштабов потепления последних десятилетий на фоне изменчивости климата последних пяти столетий (Briffa et al. 2001), глобальных похолоданиях, наступающих после крупных вулканических извержений (D'Arrigo et al. 2013), неодновременности и пространственной неоднородности проявления мультидекадных потеплений и похолоданий последнего тысячелетия (Neukom et al. 2019), и других.

Однако, при всех своих достоинствах, древесно-кольцевые данные обладают и рядом ограничений. Главное из них – сохранение и адекватное отражение долгопериодного климатического сигнала. Именно этой проблеме и посвящена данная работа. Проблема долгопериодного сигнала важна в палеоклиматологии в частности и в климатологии вообще, поскольку именно этот сигнал может быть выражен в виде линейного тренда или периодической функции, отражающей квазипериодические колебания климата. Если понять природу этих типов изменчивости, то такие климатические колебания легче всего поддаются прогнозированию. К подобным долгопериодным изменениям относятся, в частности, и современное потепление, и квазипериодические колебания естественной природы, выявленные для голоцена. Так, по данным работы (Wanner et al. 2008), в голоцене наиболее выраженными и устойчивыми являются периоды продолжительностью около 200, 500 и 1500 лет.

В этой работе не рассматриваются принципы и методы дендрохронологии, не относящиеся к выявлению долгопериодной климатической изменчивости, поскольку этот метод многократно доказал свою адекватность, надежность и воспроизводимость результатов. Для знакомства с биологическими и экологическими основами метода, можно обратиться к обширной специальной литературе (Ваганов, Шашкин 2000; Vaganov et al. 2006; Speer 2012; и др.). Здесь также не рассматриваются «неклиматические» приложения метода, в частности датировки археологических и архитектурных объектов, погребенной древесины, реконструкции различных природных процессов (колебания ледников, уровней озер и др.), в том числе опасных (сели, лавины, оползни, обвалы), экологических аспектов, применения дендрохронологии в лесоведении, парковом хозяйстве и др.

Цель и задачи работы. Цель работы – выявить возможности и ограничения реконструкции долгопериодных колебаний климата прошлого на основе древесно-кольцевых данных, разработать подходы к преодолению этих ограничений и апробировать разработанные подходы в разнообразных климатических обстановках.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) Обобщить основные факторы, влияющие на способность древесно-кольцевых данных воспроизводить долгопериодные климатические изменения.
- 2) Разработать методику климатической реконструкции на основе древесно-кольцевых данных, позволяющую избежать процесса стандартизации и, таким образом, сохранять долгопериодный климатический сигнал. Апробировать разработанную методику на примере одного из крупных регионов.
- 3) Разработать методику усиления климатического сигнала в древесно-кольцевых хронологиях путем удаления периодического сигнала неклиматического происхождения, апробировать ее на регионе с нарушениями прироста, связанными с насекомыми-вредителями. На основе разработанной методики построить реконструкцию летних температур и исследовать долгопериодную изменчивость в ней.
- 4) Исследовать древесно-кольцевые хронологии без выраженной долгопериодной изменчивости на предмет нестационарности в смысле

содержания долгопериодной изменчивости в расчетных характеристиках временных рядов.

- 5) Объединить древесно-кольцевые данные с другими источниками палеоклиматической информации для синтеза климатических сигналов присущих каждому из палеоархивов.
- 6) Разработать методику прогноза прироста, учитывающую принцип лимитирующих факторов. Определить способность разработанной методики генерировать климатически обусловленную долгопериодную изменчивость. На основе разработанной методики построить прогноз прироста в 21 веке для разных регионов мира.

Защищаемые положения.

- 1) Разработан метод построения климатических реконструкций на основе древесно-кольцевых данных, позволяющий исключить этап стандартизации и связанное с ним нарушение долгопериодной климатической изменчивости в реконструкциях. На этой основе построена реконструкция летних температур для северной Фенноскандии за два тысячелетия, содержащая значимый отрицательный тренд -0.27°C за тысячу лет.
- 2) Долгопериодная климатическая изменчивость может содержаться в изменении во времени количества образцов с высокими и низкими значениями измеренных параметров годичных колец, что говорит о необходимости учета структуры выборки в дендроклиматических исследованиях.
- 3) Разработана методика удаления периодического сигнала неклиматической природы из древесно-кольцевых данных методом анализа сингулярного спектра, на ее основе выполнена реконструкция летней температуры на Огненной Земле с 1765 года, содержащая значимый отрицательный тренд -0.41°C за сто лет.
- 4) В древесно-кольцевых хронологиях, не содержащих долгопериодную изменчивость в средних значениях, может содержаться долгопериодная изменчивость дисперсии и времени возврата экстремумов, несущая информацию о долговременных изменениях экстремальности климата.
- 5) Наличие сильного климатического отклика и высокой репликации древесно-кольцевых данных является важнейшим условием сохранения в них долгопериодного климатического сигнала.
- 6) Разработана методика прогноза прироста деревьев, учитывающая принцип лимитирующих факторов, на ее основе выполнены прогнозы прироста в 21-

м веке в Чили, на Соловецких островах и в Поволжье, показывающие разнонаправленные долговременные тренды приростов в этих регионах.

Научная новизна работы. В работе представлены новые методы, направленные на выделение и усиление долгопериодного сигнала в древесно-кольцевых данных. Описаны новые подходы к определению параметров древесно-кольцевых данных, несущих информацию о долгопериодных климатических изменениях. Впервые представлена методика прогнозирования прироста на основе модели VS-Lite и показано, что она способна генерировать долгопериодные колебания прироста. Представлено несколько новых палеоклиматических реконструкций – пространственная реконструкция засушливости для Европейской части России с 1400 года, реконструкция летних температур северной Фенноскандии за последние два тысячелетия, реконструкция летних температур на Огненной Земле с 1766 года, реконструкция среднегодовых температур северо-восточной Европы за последние два тысячелетия.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты предполагается использовать в работе исследовательских коллективов в научных и образовательных организациях в сфере высшего образования (в том числе в научно-исследовательской работе студентов и аспирантов). В некотором смысле работа может служить дополнением и продолжением классического русскоязычного учебника по дендрохронологии (Шиятов и др. 2000), где описаны лишь первоначальные этапы дендроклиматического исследования.

Полученные наборы древесно-кольцевых данных представлены в международном банке древесно-кольцевых данных ITRDB (<https://www.ncsl.noaa.gov/products/paleoclimatology/tree-ring>), а построенные реконструкции – в международном архиве палеоклиматических реконструкций (<https://www.ncsl.noaa.gov/products/paleoclimatology/climate-reconstruction>), и уже неоднократно были использованы при проведении обобщающих палеоклиматических исследований (например, Meyer-Jacob et al. 2015; Wilson et al. 2016). Полученные результаты уже используются в климатологических исследованиях для верификации и настройки климатических моделей (Scafetta 2021, 2022).

Личный вклад автора. Данная работа содержит результаты исследований, проведенных соискателем с 2009 по 2022 г. Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих научных работах,

выполненных как лично, так и в соавторстве: (Мацковский 2011; Klimenko et al. 2014; Matskovsky and Helama 2014, 2016; Matskovsky et al. 2019, 2020a, b, 2021, 2022; Cook et al. 2020; Helama and Matskovsky 2020; Morales et al. 2020; Hadad et al. 2021; Helama et al. 2021). Постановка целей и задач различных этапов исследования были осуществлены соискателем. Многие методы, использованные в данном исследовании, были разработаны соискателем. Соискатель принимал участие и руководил экспедициями по отбору дендрохронологических образцов в 31 субъекте Европейской территории России, а также в пяти провинциях Аргентины. Эти образцы стали основой для построения древесно-кольцевых хронологий, использованных в данном исследовании. Соискателем самостоятельно получены многие исходные материалы для исследования – проведено измерение и перекрестное датирование образцов, измерение ширины колец, видовое определение погребенной древесины, построение древесно-кольцевых хронологий, в том числе и тех, которые обеспечили надежное датирование многочисленных археологических и исторических артефактов, таких как икона Богоматерь Дексиократусса (Matskovsky et al. 2016), церковь Иоанна Богослова на р. Ишне (Мацковский 2013), дом Бажениных в Вавчуге, дом Скобелкиных в музее деревянного зодчества в Костроме, и других. Датированные серии вошли в базовые хронологии, которые, в частности, были использованы в данной работе для анализа долгопериодной климатической изменчивости. Они позволили продлить их, увеличить наполненность образцами и повысить достоверность реконструкций и их временной охват.

Апробация работы и публикации. Результаты работы были представлены с 2009 по 2022 год на семинарах лаборатории дендрохронологии ИГ РАН и на девяти российских и международных дендрохронологических конференциях: РусДендро (в 2011 г. в Екатеринбурге, в 2014 г. в Чолпон-Ате, Киргизия, в 2021 г. в Абакане), WorldDendro (в 2010 г. в Рованиеми, Финляндия, в 2014 г. в Мельбурне, Австралия, в 2018 г. в Тхимпху, Бутан), AmeriDendro (в 2016 г. в Мендосе, Аргентина), конференции Азиатской ассоциации дендрохронологов (в 2013 г. в Тегеране, Иран и в 2015 г. в Катманду, Непал). Также они были представлена на шести международных конференциях палеогеографической и общегеографической тематики: конференциях PAGES (в 2009 г. в Корвалисе, США, в 2013 г. в Гоа, Индия, в 2015 г. в Гданьске, Польша, в 2022 г. в Агадире, Марокко), конференции EGU в 2009 г. в Вене, Австрия и конференции AAG в

2010 г. в Вашингтоне, США, а также на нескольких российских конференциях различной тематики.

Результаты исследований опубликованы в 25 научных статьях в российских и международных журналах, входящих в списки ВАК, Scopus и Web of Science и в одной монографии. За серию работ по дендрохронологической тематике в 2020 году соискатель был награжден премией Правительства Москвы молодым ученым.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 287 страницах и включает 55 рисунков и 16 таблиц. Работа состоит из введения, восьми глав, заключения, выводов, списка терминов, списка сокращений, списка используемой литературы и приложения. Первая глава представляет собой постановку проблемы и обзор литературы. Результаты исследования и их обсуждение представлены в семи главах. Список литературы содержит 408 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Постановка проблемы

I. Место древесно-кольцевых данных в палеоклиматологии. Математически климат определяется как статистический ансамбль состояний, принимаемой климатической системой за достаточно большой интервал времени (Дымников, Филатов 1994). Таким образом, конкретное определение долгопериодной климатической изменчивости зависит от рассматриваемого временного масштаба.

Максимальный период жизни дерева как организма с одним стволом не превышает 6 тысяч лет. Но такая продолжительность жизни – редкость для древесных растений. Возраст деревьев, обычно используемых в дендроклиматических реконструкциях, редко превышает 600-1000 лет, а чаще он ограничен 300-400 годами. Благодаря принципу перекрестного датирования, основанному на синхронности прироста деревьев, произрастающих в одних климатических условиях, удается строить древесно-кольцевые хронологии (ДКХ), т. е. непрерывные ряды значений древесно-кольцевых параметров для каждого календарного года, продолжительностью в тысячи лет. Наиболее длинные из них на данный момент покрывают весь голоцен (Friedrich et al. 2004; Nicolussi et al. 2009; Хантемиров и др. 2021). Для наиболее протяженных дендроклиматических реконструкций обычно используются ряды длиной 1-2 тысячи лет (Matskovsky and Helama 2014; Wilson et al. 2016; Büntgen et al. 2021b),

и лишь некоторые из них на данный момент покрывают большую часть голоцена (Хантемиров и др. 2021; Helama et al. 2018, 2022). Объектом данного исследования являются древесно-кольцевые данные (ДКД), поэтому в работе будут рассмотрены временные периоды не длиннее 7,5 тысяч лет, т.е. климатические изменения в среднем и позднем голоцене.

Несмотря на описанные преимущества древесно-кольцевых данных, до сих пор ведутся споры о важнейшем их свойстве – наличии или отсутствии способности сохранять долгопериодную климатическую изменчивость. В то время как одни исследователи указывают на ограничения традиционных древесно-кольцевых данных, таких как ширина и максимальная плотность годовых колец, в воспроизведении долгопериодной изменчивости по сравнению с другими палеоархивами (Klippel et al. 2020), в некоторых наборах ДКД были найдены значимые тысячелетние тренды (Esper et al. 2012a; Büntgen et al. 2021b; Helama et al. 2022), связанные с изменением орбитальных параметров Земли и соответствующими климатическими изменениями.

Чтобы исследовать долгопериодную климатическую изменчивость, прежде всего нужно определиться с характерными временными периодами. При исследовании долгопериодной климатической изменчивости в древесно-кольцевых данных в работе подразумеваются изменения с характерным периодом колебаний *первые сотни – первые тысячи лет*. Для унификации *долгопериодными считаются любые колебания с периодом больше ста лет*. Однако необходимо заметить, что часто под этим термином, употребляемом в контексте дендроклиматических реконструкций, имеются в виду периоды, превосходящие средний или максимальный возраст исследованных деревьев (Cook et al. 1995). Поскольку возраст деревьев может значительно отличаться от исследования к исследованию, привязка к возрасту деревьев неудобна в контексте обобщающей работы. В некоторых случаях речь также пойдет о *трендах, выраженных на протяжении нескольких сотен – первых тысяч лет*. Тренд, присутствующий на всей длине ряда, в свою очередь, может быть частью цикла с периодом, превышающим двойную длину ряда.

II. Возрастные тренды в сериях измерений параметров годовых колец и их влияние на реконструкцию долгопериодной климатической изменчивости.

Деревья являются своеобразными биологическими фильтрами-преобразователями климатического и других сигналов, а также их «смесителями». Обнаружить, расшифровать, разделить и выделить важную климатическую информацию из различных параметров годовых колец деревьев

– задача дендроклиматологии. Известно, что в ширине колец присутствует возрастной тренд. У молодых деревьев ширина колец обычно несколько лет повышается, а затем начинает постепенно уменьшаться на протяжении остальной жизни дерева (Schweingruber et al. 1988; Briffa et al. 1992, 2001; Helama et al. 2008). Это связано, прежде всего, с геометрией дерева – когда одно и то же количество биологического материала распределяется по кольцу с некоторым внутренним радиусом, его ширина будет убывать с возрастанием этого радиуса.

Так как многие биологические процессы в дереве связаны с его возрастом и размером, возрастные тренды присутствуют и в других параметрах годичных колец: плотности, количественных параметрах анатомического строения древесины, относительном содержании стабильных изотопов в древесине. Наличие этих биологических трендов, не связанных с климатическими изменениями, затрудняет извлечение долгопериодного климатического сигнала из древесно-кольцевых данных, так как биологический сигнал зашумляет климатический, а разделить эти два сигнала – непростая задача. На большом массиве древесно-кольцевых данных, покрывающих последнее тысячелетие, было показано, что возрастной тренд присутствует не только в ширине и плотности, но и в относительном содержании стабильного изотопа углерода C^{13} . Отсутствие возрастного тренда было показано только для относительного содержания изотопа кислорода O^{18} (Torbensohn et al. 2022). Так как для изотопа углерода C^{13} также приходится учитывать эффект Зюсса (Suess 1955; Keeling 1979), состоящий в антропогенном изменении изотопного состава атмосферы на фоне сжигания ископаемого топлива, именно относительное содержание изотопа кислорода O^{18} может являться одним из наиболее перспективных параметров для изучения долгопериодной климатической изменчивости на основе ДКД. Другими перспективными параметрами являются количественные показатели анатомического строения древесины (Björklund et al. 2020).

Потребность разделять влияние внешних климатических факторов на прирост деревьев и возрастные тренды, присутствующие в абсолютном большинстве наборов дендрохронологических данных, а также учитывать другие факторы, влияющие на параметры годичных колец, привела к созданию специфических методов удаления возрастного тренда, преобразования и объединения отдельных серий измерений древесно-кольцевых параметров в хронологически-упорядоченные ряды значений. В совокупности эти методы называются «стандартизацией» (Fritts 1976). В главе 1 приведены сведения об актуальном состоянии области стандартизации в дендроклиматологии.

III. Важность периода калибровки для восстановления долгопериодной изменчивости. Калибровка косвенных данных о климате прошлого является важнейшим этапом при получении количественных реконструкций климатических параметров. Для того, чтобы определить, каким значениям климатического параметра соответствуют значения некоторого прокси, их нужно сопоставить с соответствующими значениями за инструментальный период. Это узкое место многих палеоклиматических исследований, так как до сих пор во многих регионах мира длина инструментальных рядов не превышает 50-70 лет. При этом исследователи неоднократно обращали внимание на важность периода калибровки, в том числе для реконструкции долгопериодной изменчивости. В работе Л. Клиппель и соавторов (Klippel et al. 2020) было показано, что только нормализация древесно-кольцевых данных за разные подпериоды приводит к изменению значений доиндустриального тысячелетнего тренда вплоть до противоположных.

Хотя некоторые исследователи указывают на ограниченную способность древесно-кольцевых данных представлять долгопериодную климатическую изменчивость по сравнению с другими прокси, именно данные высокого разрешения обладают неоспоримым преимуществом по длине периода калибровки. Отсутствие же достаточного периода калибровки данных низкого разрешения может представлять серьезную проблему для количественных реконструкций на их основе, в том числе для точной оценки долгопериодной климатической изменчивости.

IV. Дивергенция и нарушения принципа униформизма. В середине 1990-х годов исследователи впервые начали обращать внимание на ослабление климатического отклика в некоторых древесно-кольцевых хронологиях северного полушария (Jacoby and D'Arrigo 1995). Визуально ряды древесно-кольцевых хронологий начали «отклоняться» от рядов инструментальных температур, поэтому этот феномен был назван «дивергенцией» (отклонением). Позже похожая проблема была обнаружена во многих районах северного полушария (см. обзор D'Arrigo et al. 2008 и статью Sidorova et al. 2016), а также в некоторых хронологиях южного полушария (например, Matskovsky et al. 2019).

Проблема дивергенции важна для реконструкции долгопериодной климатической изменчивости на основе ДКД по нескольким причинам. Во-первых, ее наличие может говорить о нарушении одного из основополагающих принципов дендроклиматологии – принципа униформизма (Шиятов и др. 2000). Если установленная зависимость вариации параметров годовых колец от

климата может изменяться во времени, то как использовать ее для реконструкции климата в прошлом? Тем не менее, если зависимость нарушается исключительно под влиянием некоего антропогенного фактора, проявившегося только в последнее время, то зависимость, установленная для периода, не затронутого антропогенным влиянием, может быть использована в соответствии с принципом униформизма. Во-вторых, из сказанного вытекает, что наличие дивергенции может привести к сокращению периода калибровки. В-третьих, наличие дивергенции может говорить о физиологических ограничениях на амплитуду реконструируемых климатических параметров. В-четвертых, причиной дивергенции может быть изменение климатического отклика на фоне значительных изменений окружающей среды или локальных условий произрастания. Все эти изменения должны рассматриваться в совокупности при проведении дендроклиматического исследования (Vaganov et al. 2006), но безусловно могут сильно осложнить палеоклиматическую интерпретацию ДКД.

V. Проблема соотношения долгопериодной и высокочастотной изменчивости.

Одним из важнейших вопросов палеоклиматологии является соотношение долгопериодной и высокочастотной изменчивости климата в прошлом. Преобладание низкочастотной изменчивости в спектральных характеристиках климатических рядов говорило бы о значительных изменениях в средних значениях состояния климата, тогда как преобладание высокочастотной изменчивости на некотором временном периоде может говорить о преобладающей важности концентрации экстремальных событий над изменением средних значений. Очевидно, что ответить на данный вопрос невозможно опираясь только на прокси-данные низкого разрешения. Именно поэтому прокси-данные высокого разрешения, к которым относятся и древесно-кольцевые данные, должны использоваться для построения рядов как можно большей продолжительности, а ряды, включающие данные различного разрешения на разных своих участках, должны с осторожностью использоваться для интерпретации различий, например, современного климата и климатов прошлого (У. Бюнтген, сообщение на РусДендро 2021).

Климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях иногда может даже лучше проявляться на низких частотах, чем на высоких. Например, составные хронологии ширины годичных колец для Вологодской и Архангельской областей не обладают тесной связью с инструментальными температурами (коэффициенты корреляции $< 0,4$ для всех летних месяцев). При этом была замечена их корреляция на длительных масштабах с температурами

северного полушария, восстановленными на основе древесно-кольцевых данных (Wilson et al. 2016). Для архангельской ДКХ помимо высокой синхронности долгопериодной изменчивости ($r = 0,69$ для сглаживающих 100-летних сплайнов), ряды также имеют значимое сходство межгодовой изменчивости. Коэффициент корреляции исходных рядов равен $r = 0,36$ на периоде 1452-2014 гг. Корреляция ширины колец Вологодской области с реконструкцией NTREND – $r = 0,39$ для исходных рядов и $r = 0,68$ для значений, сглаженных 100-летним сплайном на периоде – 1085-2010 гг. При этом потенциал реконструкции межгодовой изменчивости может быть ограничен, что и наблюдается для двух рассмотренных хронологий ширины годовых колец.

Помимо перечисленных факторов, имеющих значение для реконструкции долгопериодной климатической изменчивости на основе ДКД, можно обозначить следующие: снижение количества образцов в ранней части хронологии, что приводит к увеличению разброса и снижению соотношения сигнал-шум (Frank et al. 2007); различие трендов в орбитальных форсингах по регионам и по сезонам (Lücke et al. 2021); различие в климатическом отклике различных параметров годовых колец на разных частотах (Fonti et al. 2009); изменение свойств древесины при долговременной фоссилизации, и преимущественное сохранение более плотной древесины (Helama et al. 2022). Многие из описанных проблем, относящихся к пониманию возможностей и ограничений древесно-кольцевых данных в восстановлении долгопериодной климатической изменчивости еще далеки от решения, что потребует концентрации усилий сообщества дендрохронологов и других специалистов по палеоклимату. Поэтому в работе не ставится цели окончательно ответить на вопросы, поставленные в данной главе. Вместо этого, в рамках данной работы хотелось бы сформулировать некоторые частные вопросы, имеющие отношение к поставленной проблеме, и попытаться ответить на них:

- 1) Какие из существующих методов стандартизации дают преимущество при восстановлении долгопериодных сигналов? (Глава 2)
- 2) Можно ли отойти от стандартизации древесно-кольцевых данных и какие это могло бы дать преимущества? (Глава 3)
- 3) Какие свойства набора древесно-кольцевых данных могут быть ответственны за содержащуюся в них долгопериодную изменчивость? (Глава 3)
- 4) Как периодический сигнал неклиматической природы может повлиять на реконструируемую долгопериодную изменчивость? И как можно устранить нежелательные эффекты этого влияния? (Глава 4)

- 5) Могут ли быть получены достоверные реконструкции, отражающие долгопериодную климатическую изменчивость, на основе древесно-кольцевых хронологий, построенных с помощью консервативных методов стандартизации? (Глава 5)
- 6) Содержится ли долгопериодная изменчивость в рядах данных, спектральные характеристики которых не выявляют долгопериодных циклов? (Глава 6)
- 7) Как можно объединять древесно-кольцевые данные с другими источниками данных о климате прошлого? Как они согласуются друг с другом и как друг друга дополняют? (Глава 7)
- 8) Каково значение долгопериодной изменчивости в древесно-кольцевых данных для прогнозов прироста деревьев в будущем? (Глава 8)

Глава 2. Методы стандартизации, сохраняющие долгопериодную изменчивость в древесно-кольцевых данных

Методика стандартизации региональной кривой роста (RCS) и ее многочисленные модификации, предложенные позже, на данный момент являются основным инструментом для извлечения информации о долгопериодной климатической изменчивости из древесно-кольцевых данных. В главе 2 проводятся различные эксперименты для определения возможных смещений в реконструированном долгопериодном сигнале при использовании различных модификаций метода RCS, а также некоторых других методов стандартизации. Помимо описания методов стандартизации и обзора литературы, им посвященной, в главе приводятся результаты экспериментов по прямому сравнению всех описанных методов на различных наборах реальных и модельных данных.

Для проведения сравнения методов, в данной работе были программно реализованы 11 методов стандартизации: классический вариант RCS, для соответствия аббревиатур называемый здесь RC1 (Briffa et al. 1992), его модификации RC1SF, RC2SF (Briffa and Melvin 2011), RC1SFC, RC2SFC – с корректировкой (Мацковский 2011; Matskovsky and Helama 2014), Age Band Decomposition, ABD (Briffa et al. 2001), Environmental curve standardization, ECS (Helama et al. 2005b), C-method, CM (Biondi and Qeadan 2008), Regional C-method, RCM (используется впервые), Signal-free, SF (Melvin and Briffa 2008) с модификацией (Anchukaitis et al. 2013), Regionally constrained signal-free, RSFi (Björklund et al. 2013).

Для сравнения перечисленных методов использовались следующие наборы данных: новые скорректированные измерения ширины и максимальной плотности годовых колец для хронологии Торнетреск, северная Швеция (Melvin et al. 2013), набор измерений максимальной плотности годовых колец для северной Финляндии (Esper et al. 2012b) и набор измерений ширины годовых колец для северной Финляндии (Helama et al. 2005a). Данные для северной Швеции и северной Финляндии были выбраны не случайно – во-первых, это очень большие наборы данных с измеренной шириной и максимальной плотностью годовых колец, с большим периодом покрытия (более 2000 лет) и хорошей репликацией данных. Во-вторых, данные для северной границы леса имеют хорошую связь с летними температурами воздуха, которая, в свою очередь, имеет большой радиус убывания корреляции, что дает дополнительную возможность для их сравнения. Были поставлены следующие эксперименты:

1) Два независимых косвенных источника данных о летних температурах воздуха (ширина (TRW) и максимальная плотность (MXD) годовых колец, данные по Торнетреску) сравнивались с измеренными температурами воздуха и между собой. Поскольку оба параметра отражают летнюю температуру воздуха (хотя ширина сильнее зависит от температур июня-июля, а плотность – от температур июня-августа), теснота корреляции хронологий, построенных различными методами для ширины и плотности годовых колец служила показателем их качества.

2) В основу сравнения двух наборов данных по MXD легло предположение об относительной пространственной однородности (гомогенности) летних температур воздуха на относительно небольшой территории северной Фенноскандии на протяжении двух последних тысячелетий. В этом случае косвенные данные о температуре (ширина годовых колец) из соседних регионов можно считать показателями одного параметра, а хронологии, построенные различными методами, сравнивать на основе сходства с хронологиями из соседнего региона.

3) Два независимых набора косвенных данных о летних температурах (максимальная плотность годовых колец из Торнетреска, северная Швеции (TORN) и северной Финляндии (FENN)) аналогично сравнивались между собой.

Результаты моделирования с заданным сигналом представлены на рис. 1. Практически во всех экспериментах, как на наборе данных по ширине, так и по

максимальной плотности годовых колец, один из лучших результатов показал метод RC2SFC. Для хронологий по псевдо-рядам максимальной плотности годовых колец, сглаженным 200-летним сплайном, лучшие результатов показал метод RC2SF, а метод RC2SFC – второй результат. Исключение составляют несглаженные хронологии по ширине годовых колец, где лучшие результаты показал метод SF, а следом за ним методы CM и RSFi. Худшие результаты на псевдо-рядах максимальной плотности годовых колец показал метод CM, что было ожидаемо, т. к. он разработан для серий ширины годовых колец. Худшие результаты на псевдо-сериях ширины годовых колец показали методы ECM и ABD на исходных хронологиях и метод SF на сглаженных хронологиях. Это еще раз подтверждает плохую сохранность низкочастотных колебаний в хронологиях, построенных модифицированным SF методом.

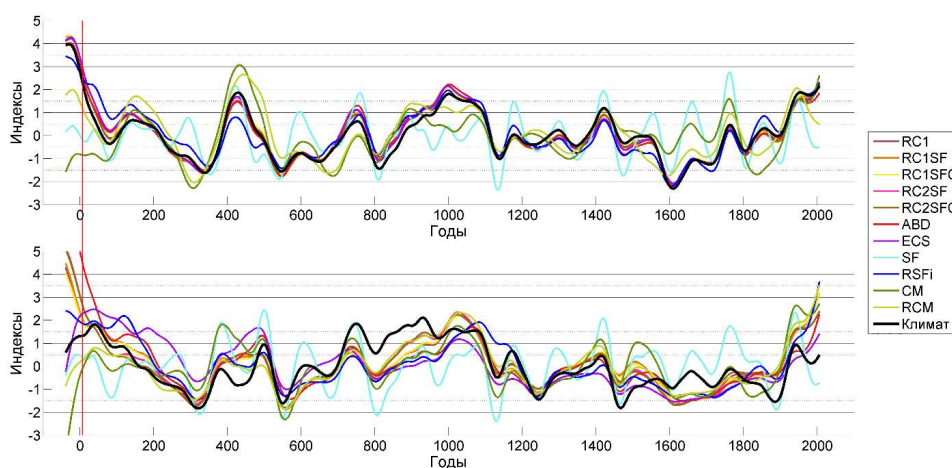


Рисунок 1 – Модельный климатический сигнал (черная линия) и хронологии, построенные по модельным данным различными методами (цветные линии). Сверху – данные по плотности FENN, климат по ширине TORN. Снизу – данные по ширине TORN, климат по плотности FENN. Сглаживание 100-летним сплайном. Вертикальная линия показывает 7 г. н.э., после которого проводилось сравнение.

Ни один из одиннадцати исследованных методов не показал лучшие результаты во всех проведенных экспериментах в смысле выбранных критериев оценки производительности методов. При восстановлении долгопериодной изменчивости можно выделить преимущество различных модификаций метода RCS.

Глава 3. Метод прямой реконструкции DIRECT – альтернатива стандартизации

Так как процесс стандартизации, являющийся общепринятым способом работы с дендрохронологическими данными и включающий удаление возрастного тренда из серий измерений годовых колец, приводит к потере некоторой части долгопериодной изменчивости исходных данных, возникает вопрос, нет ли альтернативы этому процессу. В главе 3 приводится описание метода прямой реконструкции, являющегося такой альтернативой. Показано его применение на реальном наборе данных, построена палеоклиматическая реконструкция. Исследуется его способность сохранять долгопериодную климатическую изменчивость.

1. Основная концепция и описание метода DIRECT. Обычно процесс дендроклиматической реконструкции проходит в четыре этапа. Во-первых, проводится детрендинг перекрестно-датированных серий измерений годовых колец. Этот процесс переводит исходные серии измерений годовых колец к безразмерным индексам, которые, как ожидается, не содержат долгосрочных неклиматических трендов. Во-вторых, отдельные серии индексов усредняются в обобщенную хронологию. В-третьих, обобщенная хронология используется для построения трансфер-функции, связывающей реконструируемый климатический параметр и полученную хронологию на инструментальном периоде. В-четвертых, после удостоверения в устойчивости связи параметров климата и годовых колец, можно восстановить изменчивость климата в прошлом, применив полученную трансфер-функцию к доинструментальному периоду, покрытому данными о годовых кольцах деревьев (Cook and Kairiukstis 1990).

В методе DIRECT используется подход, при котором фактически отсутствует второй этап (удаления возрастного тренда), а вместо этого камбиальный возраст каждого годового кольца учитывается в процессе построения трансфер-функции. Модели трансфер-функций обычно основаны на линейных зависимостях, которые статистически определяются с помощью линейной регрессии. В этих случаях независимые переменные модели состоят только из серий индексов годовых колец. Двумерная трансфер-функция, обычно применяемая в дендроклиматических исследованиях, в методе DIRECT принимает форму трехмерной поверхности (рис. 2 А).

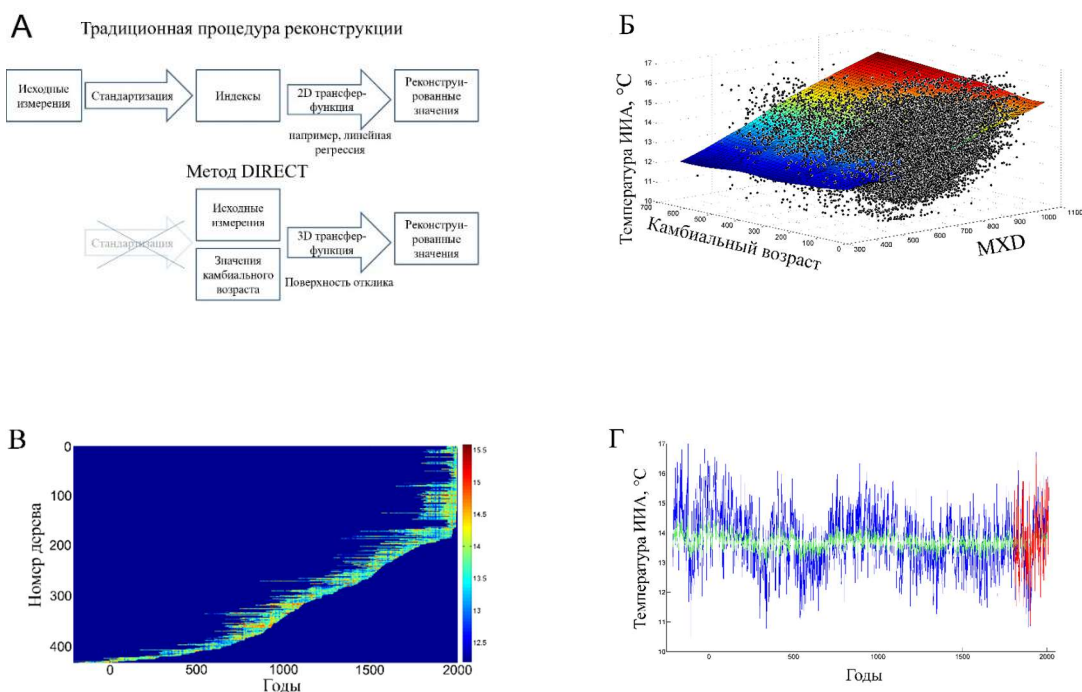


Рисунок 2 – Алгоритм метода DIRECT и пример его применения к набору данных максимальной плотности годичных колец сосны обыкновенной из северной Фенноскандии. А – Концепция метода DIRECT в сравнении с традиционной процедурой реконструкции по данным годичных колец деревьев; Б – Трехмерная поверхность в качестве модели трансфер-функции. Облако данных (черные точки) за инструментальный период (1802–2010 гг.), в пространстве MXD (ось x), камбиального возраста (ось y) и температуры июня-августа (ось z) для каждого годичного кольца сглажено 3D-поверхностью (цветная); В – 3D трансфер-функция используется для преобразования значения измеренного параметра (MXD) каждого отдельного годичного кольца (с учетом камбиального возраста) в оценку температуры (показана цветом). Годичные кольца представлены горизонтальными сериями, соответствующими отдельным деревьям; Г – Усреднение отдельных значений оценок температуры для каждого календарного года и масштабирование полученной реконструкции. Временные ряды усредненной по годам реконструкции температуры перед масштабированием (зеленая линия) и окончательная реконструкция после масштабирования (синяя линия) сравниваются с инструментальными климатическими данными (красная линия).

Форма 3D-поверхности контролируется осями независимых переменных: значениями параметров годичных колец и их камбиальным возрастом, а также осью зависимой переменной – реконструируемым климатическим параметром

(рис. 2 Б). Процесс дендроклиматической реконструкции методом DIRECT проходит в четыре этапа: построение 3D-поверхности, связывающей параметры годовых колец с целевой климатической переменной; восстановление значений климатического параметра для отдельных годовых колец; усреднение по годам; масштабирование (рис. 2).

II. Отклик максимальной плотности на температуру в зависимости от возраста. Изучение изменения связи температуры и максимальной плотности (MXD) в трехмерном пространстве при изменении камбиального возраста позволяет обнаружить ее нелинейность. Срезы трехмерной поверхности (рис. 2 Б) поперек оси камбиального возраста показывают, что возраст отчетливо влияет на изменение формы зависимости максимальной плотности от температуры (рис. 3). Кольца моложе 150 лет демонстрируют заметную нелинейность в их реакции на среднюю температуру лета.

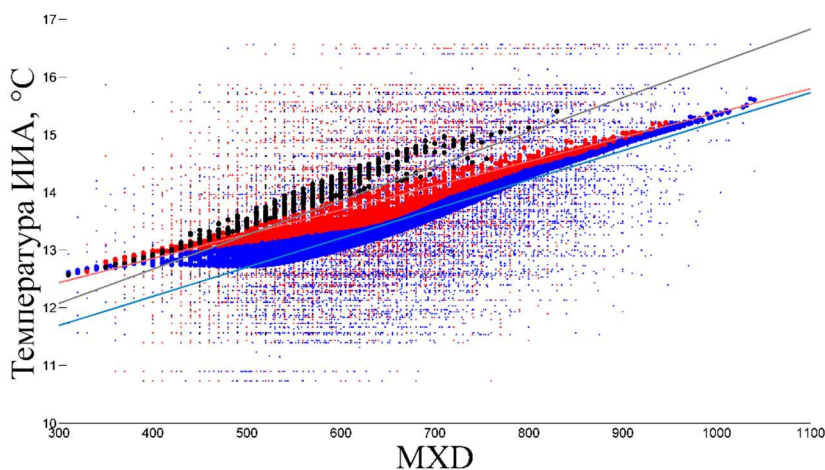


Рисунок 3 – Иллюстрация соотношения температуры и максимальной плотности (MXD) для трех различных возрастных классов (синие точки для годовых колец с камбиальным возрастом от 1 до 150 лет, красные точки – от 151 до 400 лет и черные точки – старше 400 лет). Маленькие точки показывают отдельные значения MXD относительно температур июня-августа (ИИА) за инструментальный период (1802–2010 гг.). Более крупные точки показывают разные части 3D-поверхности по возрасту, что соответствует средним температурам июня-августа для каждой пары (MXD, камбиальный возраст). Прямые линии иллюстрируют линейную связь температуры и MXD для каждого из трех возрастных классов (линии построены с использованием линейной регрессии).

Это говорит о том, что MXD может не являться одинаково надежным палеоклиматическим индикатором при повышенных и пониженных

температурах. Наклон линейной зависимости MXD от температуры для разных возрастных групп (показан прямыми линиями на рис. 3) различен. Эти результаты формируют более сложное представление о зависимости MXD от температуры и возраста дерева, чем предполагалось ранее, и позволяют по-новому взглянуть на использование данного параметра в качестве косвенного индикатора температуры. Метод DIRECT с помощью 3D-поверхности позволяет учесть различный, в том числе нелинейный, отклик формирования MXD для разных возрастных групп и при различных среднелетних температурах.

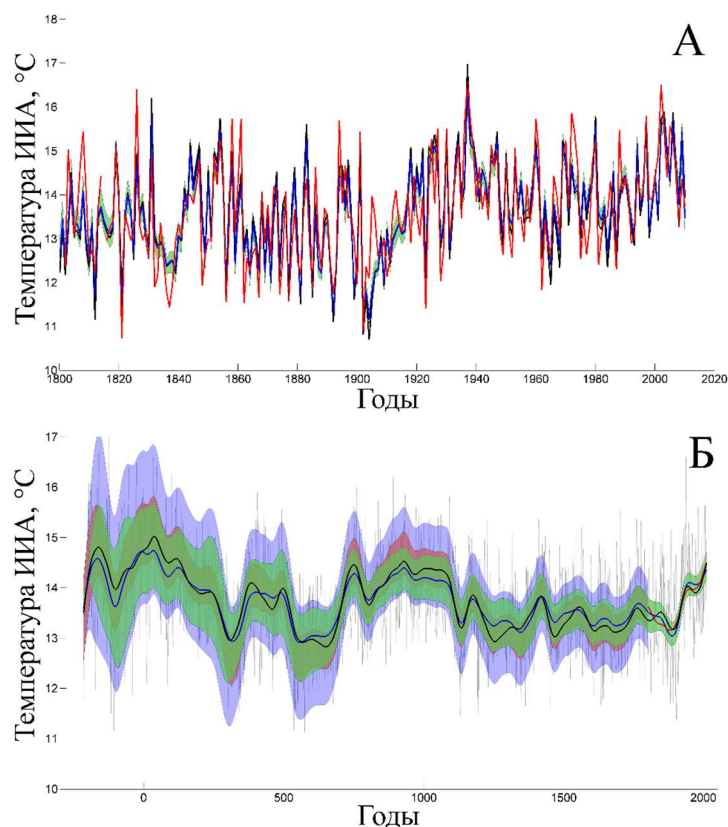


Рисунок 4 – Инструментальный ряд температур июня-августа (красный), реконструкция DIRECT (синий) и реконструкция RCS (черный), а также неопределенности реконструкции методом DIRECT: неопределенность репликации данных (зеленая заливка), неопределенность инструментального периода (красная заливка) и комбинированная неопределенность (синяя заливка). А – Инструментальный период. Б – Полный период реконструкции. Ряды сглажены 100-летними сплайнами. Несглаженная реконструкция DIRECT показана серым цветом.

III. Реконструкция температуры на основе метода DIRECT. Полученная реконструкция на основе метода DIRECT хорошо воспроизводит изменчивость инструментального ряда температуры (рис. 4 А). Реконструкция также

показывает значительную изменчивость среднелетних температур за последние 2000 лет (рис. 4 Б). Важные характеристики полученной реконструкции представлены в ее низкочастотной изменчивости. Современному летнему потеплению предшествует многовековой период более низких летних температур, часто обозначаемый как малый ледниковый период (МЛП) (Bradley and Jones 1993; Matthews and Briffa 2005; Mann et al. 2009). Кроме того, современное потепление находится на уровне повышенных значений температур в период с 8 по 11 век н.э., обычно обозначаемый как период средневековой климатической аномалии (СКА) (Mann et al. 2009; Graham et al. 2011; Goosse et al. 2012). Реконструкция также свидетельствует о высоких летних температурах в течение первых веков до нашей эры и в начале нашей эры.

Ряд существенных различий в реконструированных температурах отмечается для двух альтернативных реконструкций на основе метода DIRECT, использующих только высокие и низкие значения MXD (рис. 5).

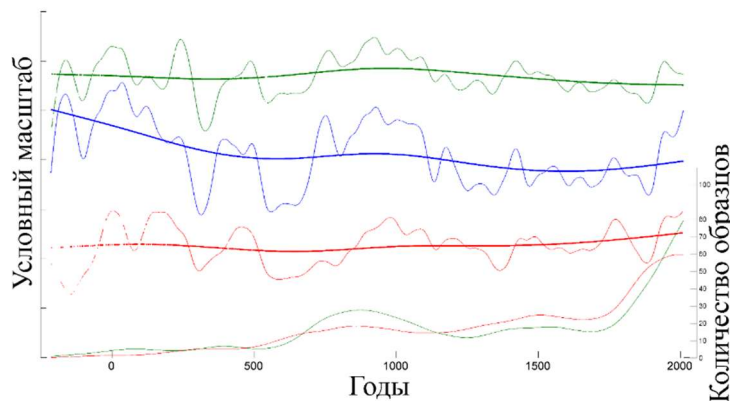


Рисунок 5 – Сравнение реконструкций DIRECT, основанных на высоких (зеленый) и низких (красный) значениях MXD, в сравнении с реконструкцией DIRECT, основанной на всей совокупности значений MXD (синий). Снизу показана количество колец с высокой (зеленый) и низкой (красный) плотностью. Четвертый этап алгоритма DIRECT (масштабирование) опущен для улучшения визуального сравнения. Исходные временные ряды сглажены 100-летними и 300-летними сплайнами.

При сравнении с реконструкцией, основанной на полном наборе доступных значений MXD, две искусственно созданные реконструкции вместе с данными о репликации высоких и низких значений MXD демонстрирует, как низкочастотная изменчивость может сохраняться в древесно-кольцевых данных. Относительное количество годовичных колец с высокой MXD увеличивается во время СКА, как и во время эпохи современного потепления, в то время как

относительное число колец с низкой MXD увеличивается во время МЛП. При этом каждая из искусственных реконструкций содержит меньше низкочастотной изменчивости, чем реконструкция, основанная на полном наборе годовых колец. Это говорит о том, что соотношение колец с высокими и низкими значениями MXD вносит вклад в среднее значение реконструкции и ее низкочастотную изменчивость. Данный вывод может свидетельствовать о том, что древесно-кольцевые данные способны сохранять долгопериодную климатическую изменчивость именно за счет структуры выборки, возможно даже при наличии эффекта дивергенции, то есть наличия нелинейного (ослабевающего) отклика при некоторых значениях климатического параметра.

IV. Новые данные об изменении летних температур в Фенноскандии за два тысячелетия. Так как было показано, что реконструкция на основе метода DIRECT позволяет учитывать дополнительные особенности роста деревьев (такие как разный климатический отклик в разном возрасте и нелинейный отклик на изменения климатических параметров), предполагается, что она несет в себе более достоверную информацию о низкочастотной изменчивости климата прошлого. Разница с реконструкцией на основе метода RCS проявляется в более глубоком пике долговременного похолодания в середине 6 в. н.э., тогда как у RCS более глубокий пик приходится на последующий период середины 7 в. н.э. 536 год н.э. известен своими аномальными климатическими условиями, которые преобладали на больших территориях Северного полушария (Stothers 1984, 1999; Arjava 2005; Baillie 2008).

Палеоклиматическая реконструкция на основе метода DIRECT указывает на возможность спровоцированного вулканическими извержениями значительного снижения летней температуры в северной Европе в течение шестого и седьмого веков нашей эры, что аналогично ранее описанным механизмам «сдвига» в климатической системе во время МЛП, а также уточняет временную последовательность и амплитуду этого события. Низкочастотной особенностью, общей для нескольких реконструкций на основе годовых колец, является тысячелетняя тенденция снижения температуры в позднем голоцене вплоть до современного потепления (Mann et al. 1999; Esper et al. 2012b, 2014; Helama et al. 2012). Этот тренд может быть связан с теорией орбитального воздействия Миланковича, согласно которой должно наблюдаться снижение летней инсоляции в этих регионах в течение нынешнего межледникового (Berger 1978, 1988).

Глава 4. Удаление периодического сигнала неклиматической природы

Периодический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях может иметь климатическое и неклиматическое происхождение. В денроклиматических исследованиях одной из первостепенных задач является максимизация первого и минимизация второго. В главе 4 рассмотрен пример, когда сигнал с периодом около 7 лет не является климатическим. Разработана методика для удаления подобного типа сигналов, и показано усиление климатической составляющей сигнала в ДКХ при ее применении. Обсуждается возможное влияние неклиматического сигнала различной периодичности на долгопериодный климатический сигнал в ДКХ.

1. Процедура удаления периодического сигнала.

В данном исследовании используется набор из 44 хронологий *N. pumilio* из аргентинского сектора Огненной Земли, образцы для которых были собраны в период с 1985 по 2006 год. Для удаления квази-семилетней периодической компоненты, предположительно связанной с неклиматическим сигналом в хронологиях, была предложена процедура на основе метода анализа сингулярного спектра (Singular Spectrum Analysis, SSA, рис. 6).

В предложенном методе учтены две особенности этого неклиматического нарушения роста деревьев: 1) неравномерное снижение прироста в разные циклы и 2) возможное возникновение максимального снижения прироста в год события или в ближайшие годы после события. Первая особенность может быть учтена благодаря способности SSA-декомпозиции извлекать сигнал постоянной периодичности, но с переменной дисперсией. Это хорошо видно на рис. 6 В, где 7-летняя составляющая имеет наименьшую дисперсию в 1750-е гг., а наибольшую – во вторую половину XIX в. Вторая особенность может быть учтена, поскольку метод не корректирует значения конкретных лет, а вместо этого вычитает циклическую составляющую из всех значений хронологии, корректируя значения для нескольких лет вокруг события.

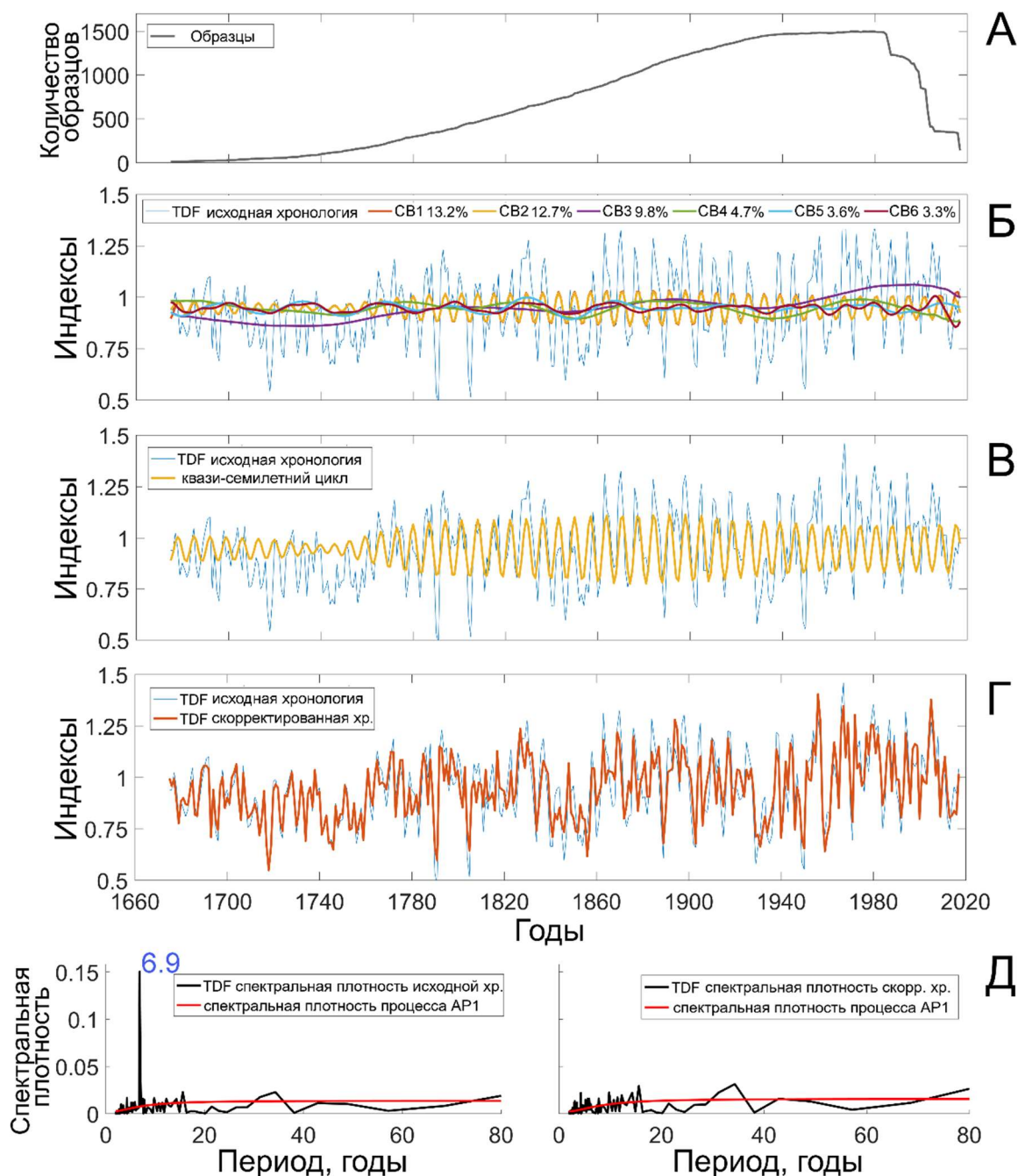


Рисунок 6 – А – Глубина выборки хронологии TDF, состоящей из всех 1605 серий измерений. Хронология ограничена 1675 годом, где имеется только 10 образцов. Б – Исходная хронология TDF и ее первые шесть собственных векторов (СВ), полученных на основе SSA. Показан соответствующий процент объясненной дисперсии для каждого СВ. В – Сумма квази-семилетних первого и второго СВ, вместе выбирающих 26% общей дисперсии. Г – Исходная и скорректированная хронологии TDF. Д – Спектральная плотность исходной (слева) и скорректированной (справа) хронологии TDF. Квази-семилетний пик (период 6,9 лет) отчетливо виден для исходной хронологии и отсутствует для скорректированной. AP1 - авторегрессионный процесс первого порядка.

III. Климатический отклик исходных и скорректированных хронологий.

Хронология TDF, составленная из всех 1605 древесно-кольцевых серий с 44 участков, показывает наибольшую реакцию на ежемесячную минимальную и среднюю температуру (положительный отклик) и частоту заморозков (отрицательный отклик) текущего и предыдущего вегетационного периодов. Скорректированная хронология TDF имеет более высокие коэффициенты корреляции с климатическими параметрами, чем исходная хронология, а именно четыре против двух значимых коэффициентов корреляции для средней температуры, семь против трех для минимальной температуры, два против одного для осадков, семь против двух для частоты морозных дней. Для всех 44-х хронологий, 16 месяцев и семи параметров (всего 4928 коррелированных рядов) имеется 374 значимых коэффициента корреляции для исходных хронологий и 478 (на 28% больше) значимых коэффициентов корреляции для скорректированных хронологий. В совокупности эти результаты подтверждают гипотезу о неклиматическом характере удаленного квази-семилетнего цикла и усилении климатического сигнала в скорректированных хронологиях.

Модель VS-Lite использовалась для воспроизведения исходной и скорректированной хронологий TDF. Модель смогла воспроизвести около 11% изменчивости исходной хронологии и около 20% скорректированной. Таким образом, есть основание полагать, что улучшение качества моделирования связано с уменьшением неклиматического шума процедурой коррекции (удаления квази-семилетнего цикла).

Комплекс факторов, влияющих на формирование годичных колец, не всегда укладывается в математическую модель, поэтому нельзя полностью избежать риска устранения определенной части климатической изменчивости. Предложенный метод устранения устойчивых циклических нарушений, не вызванных климатическими условиями, и которые, скорее всего, связаны с устойчивыми периодическими изменениями популяций дефолирующих насекомых, может удалить и некоторую часть климатической информации.

Согласно полученным результатам, древесно-кольцевые хронологии *N. pumilio* с Огненной Земли содержат значительный объем климатического сигнала, который можно извлечь, а также усилить, применяя предложенную методику корректировки хронологий.

Глава 5. Долгопериодная изменчивость летней температуры на Огненной Земле по дендрохронологическим данным

В главе 5 на основе скорректированных хронологий из главы 4, а также на основе расширенного набора из 63 древесно-кольцевых хронологий для Огненной Земли (рис. 7) построена реконструкция температуры декабря-февраля для этого региона.

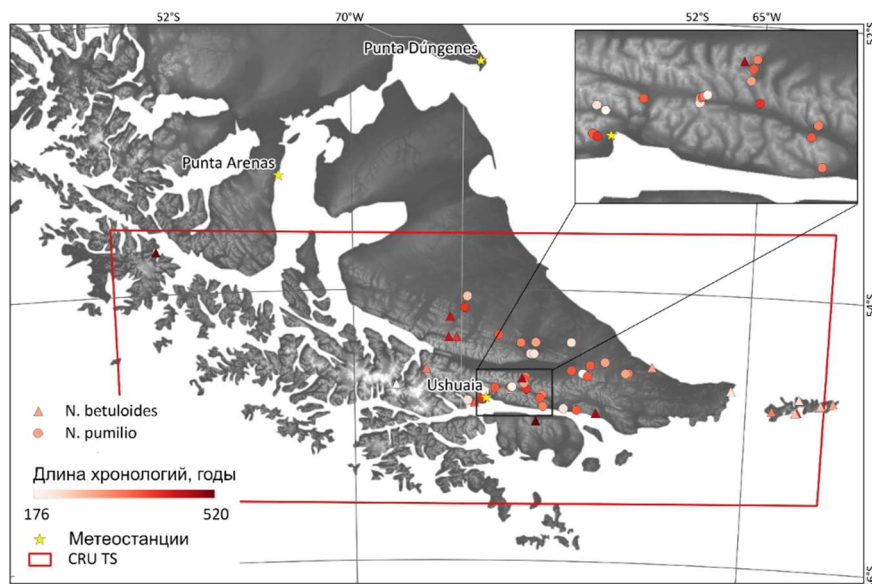


Рисунок 7 – Карта расположения ДКХ, использованных в этом исследовании. Цвет указывает длину хронологии. Границы для выбора данных из архива CRU TS, затем усредненных для получения целевой климатической переменной реконструкции, отмечены красным прямоугольником. Метеостанции с самыми длинными рядами в регионе отмечены звездочками. Топография показана в оттенках серого.

Реконструкция была построена на основе регрессии методом частных наименьших квадратов (РЧНК) и подхода со вложенными реконструкциями. Было показано преимущество метода РЧНК над методом регрессии на главные компоненты (РГК). Было проведено сравнение полученной реконструкции летней температуры для Огненной Земли с другими реконструкциями температуры для Огненной Земли и Южной Патагонии. Реконструкции, использованные для сравнения, включают реконструкцию температуры ноября-февраля для Ушуайи (Boninsegna et al. 1989), реконструкцию температуры декабря-февраля для Южной Патагонии (Neukom et al. 2011), реконструкцию среднегодовой температуры для южного сектора южных Анд (Villalba et al.

2003), а также реконструкцию минимальной годовой температуры Пунта-Аренас (Aravena et al. 2002), далее обозначаемые как B89, N11, V03 и A02, соответственно (рис. 8). Все реконструкции, кроме N11, основаны исключительно на древесно-кольцевых данных, тогда как N11 представляет собой реконструкцию на основе различных косвенных источников о климате прошлого (мульти-прокси). Некоторые различия между сравниваемыми реконструкциями, безусловно, связаны с разными целевыми переменными или регионами происхождения данных, однако определенное сходство реконструкций также очевидно. Эти черты сходства указывают на наиболее заметные и, возможно, наиболее достоверные колебания температур в прошлом на Огненной Земле и в Южной Патагонии.

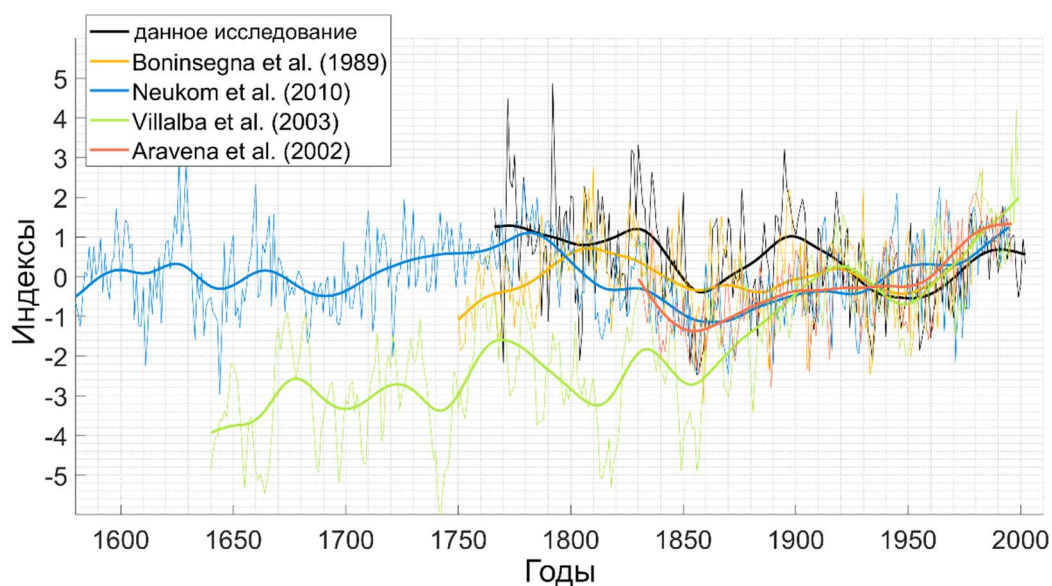


Рисунок 8 – Сравнение различных реконструкций температуры для Огненной Земли и Южной Патагонии. Все реконструкции нормированы за период 1901-1983 гг. Тонкие линии — годовые значения, жирные линии — 50-летние сглаживающие сплайны.

Одним из наиболее очевидных сходств является ярко выраженный холодный период, продолжавшийся почти десятилетие в 1850-х годах. Другие общие черты включают относительно теплые периоды 1760–90-х годов (отсутствующий в B89), 1820–30-х и 1910-х годов. На низких частотах также прослеживается похолодание в 1790-1820-е гг. (отсутствующее в B89), причем в новой реконструкции для Огненной Земли, как и в N11, оно ознаменовано резким, но кратковременным похолоданием в 1800-е годы.

Для оценки количественного сходства сравниваемых реконструкций были рассчитаны коэффициенты корреляции между этими реконструкциями для общего периода 1830–1983 гг. Полученная реконструкция имеет наибольшую корреляцию с A02 ($r = 0,38$). Корреляции с реконструкциями без тренда увеличиваются, достигая самых высоких значений $r = 0,58$ и $r = 0,42$ для A02 и V03 соответственно. Реконструкции N11, V03 и A02 показали высокие значения попарных коэффициентов корреляции (в пределах от 0,48 до 0,53), во-первых, за счет общих трендов (коэффициенты корреляции для этих же реконструкций без тренда ниже, в пределах от 0,32 до 0,34), а во-вторых, из-за наличия общих предикторов, поскольку N11 также включает древесно-кольцевые данные, использованные для построения реконструкций V03 и A02.

Относительно долгопериодной изменчивости, представленной в сравниваемых реконструкциях, можно сделать следующие замечания. Во-первых, как уже было отмечено, сильный положительный тренд в реконструкции V03, скорее всего, имеет искусственное происхождение и не отражает действительное изменение температуры в соответствующем регионе. Этот тренд также существенно отличается от поведения всех остальных рассмотренных реконструкций. Во-вторых, обращает на себя внимание отсутствие долговременного тренда в мульти-прокси реконструкции N11 – единственной из рассмотренных реконструкций, включающей не только древесно-кольцевые, но и другие типы косвенных данных. Именно в ней могло бы ожидаться наличие долгопериодной изменчивости, однако тренд в этой реконструкции за период с 1600 года не значим ($\alpha = 0,41$). В-третьих, в представленной реконструкции есть значимый линейный убывающий тренд ($\alpha < 10^{-6}$) за весь период реконструкции – с 1765 года. При этом и в реконструкции N11, и реконструкции из данного исследования наблюдаются высокие значения температуры декабря-февраля во второй половине 18 века, сравнимые с температурами последних десятилетий или выше них.

На основе приведенных наблюдений можно утверждать, что представленная реконструкция отражает долгопериодную изменчивость летних температур на Огненной Земле за период с 1765 года. Основной характеристикой этой долгопериодной изменчивости является значимый отрицательный тренд - 0,41 °C за сто лет. Кроме того, наблюдается убывание дисперсии представленной реконструкции. Является ли это изменение действительным отражением климатических изменений в регионе, вызванное ослаблением экстремальности климата с конца 18 века, или оно связано со свойством древесно-кольцевых

данных увеличивать дисперсию при уменьшении количества деревьев при движении в прошлое, остается вопросом для будущих исследований. Продление ДКХ на Огненной Земле с использованием погребенной древесины может разрешить эту проблему, а также уточнить параметры долгопериодной климатической изменчивости в регионе.

Глава 6. Скрытая долгопериодная изменчивость в древесно-кольцевых данных

При исследовании древесно-кольцевых данных часто используют ряды, из которых специально для усиления высокочастотной составляющей и для устранения возможного смещения климатического сигнала, связанного с биологическими особенностями роста деревьев, удалена долгопериодная изменчивость. Но даже если в обработанных (стандартизированных) сериях измерений долгопериодная изменчивость отсутствует, она может сохраняться в некоторых характеристиках этих серий. Для описания такого рода изменчивости вводится понятие «скрытая долгопериодная изменчивость», что означает, что она отсутствует в изменении средних значений самого ряда, но может быть обнаружена в изменчивости других его характеристик. В главе 6 рассматриваются такие характеристики рядов реконструкций засушливости, полученных на основе древесно-кольцевых данных с использованием различных методов и для разных регионов, а именно время возврата экстремальных событий и изменение стандартного отклонения во времени. Показано, что данные характеристики рядов могут обладать долгопериодной изменчивостью даже при ее отсутствии в средних значениях этих рядов.

1. Долгопериодная изменчивость в рядах засушливости для Поволжья. При разработке атласа засух Европейской России (European Russia Drought Atlas, ERDA) было использовано 697 ДКХ, многие из которых были построены специально для этого атласа. Только на территории Европейской части России сеть увеличилась с четырех хронологий, использованных в атласе засух Старого Света (OWDA), до 275 хронологий, использованных в ERDA. В главе 6 подробно представлена методика построения атласа засух Европейской России.

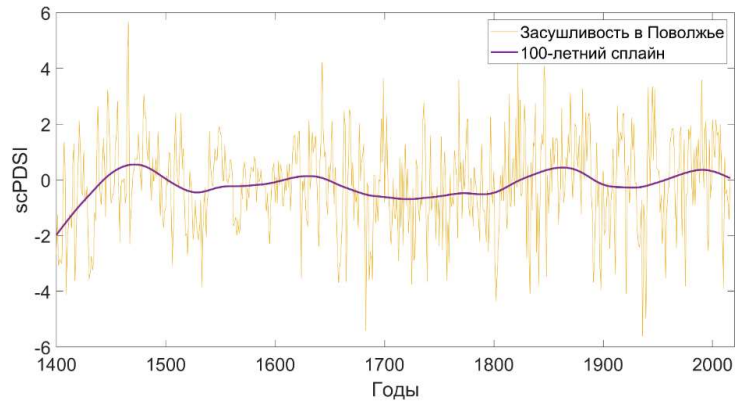


Рисунок 9 – Серия показателя засушливости scPDSI для региона Поволжья и ее сглаживание 100-летним сплайном.

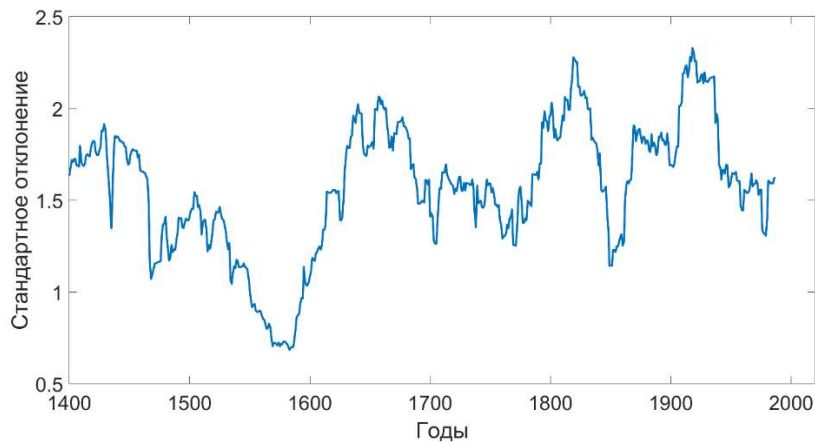


Рисунок 10 – Скользящее стандартное отклонение для серии на рис. 9 в 30-летнем окне. Значение показано для окна, первый год которого соответствует году на оси.

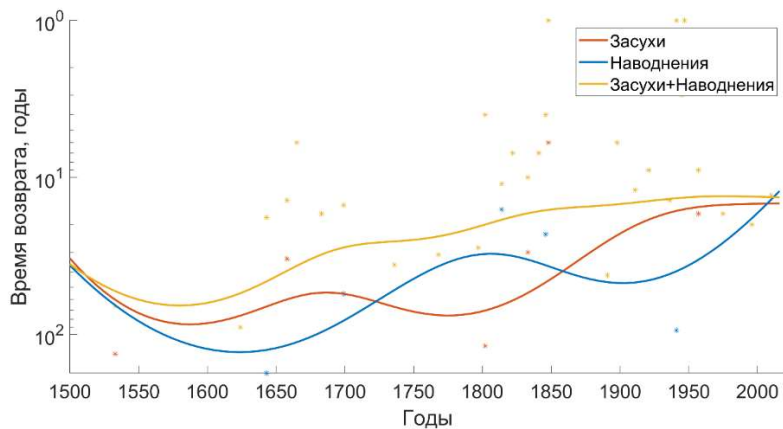


Рисунок 11 – Время возврата экстремальных событий (более двух стандартных отклонений по модулю) для серии на рис. 9. Время возврата для индивидуальных событий показано звездочками. Сглаженные гауссовским ядром серии показаны линиями.

Для анализа долгопериодной изменчивости в данной главе из всего Атласа был выбран регион Поволжья (51,25-56,25° с.ш., 45,25-55,25° в.д.), так как именно для этого региона было показано максимальное качество реконструкции на верификации. Хотя исходный ряд засушливости для Поволжья (рис. 9) не имеет значимого тренда ($\alpha = 0,081$), характеристики, рассчитанные на его основе, такие как стандартное отклонение в скользящем окне (рис. 10) или время возврата экстремальных событий (рис. 11) имеют очевидные, статистически значимые тенденции. Линейный тренд для стандартного отклонения значим на уровне $\alpha < 10^{-20}$, а для засух, наводнений и их суммы – $\alpha = 0,007$, $\alpha = 0,44$ (не значим), $\alpha = 0,0035$, соответственно. Важно отметить, что в случае Атласа засух Европейской России средняя длина индивидуальных древесно-кольцевых серий (150–300 лет) значительно меньше 600-летнего периода реконструкции, поэтому полученные тренды этих показателей говорят о наличии долгопериодной изменчивости с периодами, значительно превышающими среднюю длину использованных серий.

II. Долгопериодная изменчивость в рядах засушливости для Южной Америки. Тренды во времени возврата экстремальных событий были ранее отмечены и для рядов засушливости, рассчитанных для всей территории Атласа засух Южной Америки за период с 1400 года (Morales et al. 2020). Но подтверждая наличие долгопериодной изменчивости в характеристиках реконструированных рядов засушливости, необходимо отметить их временную неоднородность в смысле использованных ДКХ. Для построения атласов используется подход со вложенными реконструкциями, что означает использование разного набора ДКХ для разных ее периодов. Таким образом, нельзя исключать, что выделенная долгопериодная изменчивость может быть связана и с этим фактором.

Для того, чтобы исключить фактор неоднородности использованных ДКХ во времени, здесь также рассматривается реконструкция стандартизированного индекса испарения и осадков (Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) для Северной Патагонии за последнее тысячелетие (1055–2014), основанная на трех хронологиях ширины колец *Austrocedrus chilensis*, и включающая образцы из 260 живых и умерших деревьев (Hadad et al. 2021). После 1482 года эту реконструкцию можно считать однородной, так как на протяжении всего этого периода она основана на трех ДКХ, ранее же на двух (с 1178 года) и на одной ДКХ (с 1055 года). В данной реконструкции значимые тренды присутствуют в изменении амплитуды выделенной изменчивости на

частоте 5.1 лет (положительный) и 35 лет (отрицательный). Разнонаправленные тенденции говорят о постепенном смещении спектральных характеристик ряда в средне- и высокочастотной части спектра на протяжении последних 500 лет. Также были выявлены значимые отрицательные тренды во времени возврата (увеличение времени возврата со временем) наводнений ($\alpha = 0.01$) и засух с наводнениями ($\alpha = 0.001$). Во времени возврата засух тренд не значимый ($\alpha = 0.075$). Эти результаты разнятся с трендами, рассчитанными для всего Атласа засух Южной Америки SADA – в них преобладают обратные тенденции. В характеристиках изменения разброса, рассчитанных как стандартное отклонение в плавающем 30-летнем окне, значимого тренда за период с 1482 года обнаружено не было, однако присутствует изменчивость на периоде около 100 лет, тогда как в исходных данных у максимального выделенного значимого цикла период не превышает 51 год.

Эти результаты, полученные на специально ограниченном участке реконструкции, однородном с точки зрения использованных ДКХ-предикторов, подтверждают возможность выделения долгопериодной информации из древесно-кольцевых серий и реконструкций, которые не содержат долгопериодных колебаний в средних значениях временных рядов. Таким образом, информация о долгопериодных климатических изменениях в прошлом может быть получена даже на основе ДКД, ранее считавшихся неподходящими для этих целей. Палеоклиматическая интерпретация выявленной «скрытой» долгопериодной изменчивости такова, что проанализированные реконструкции указывают на долговременную изменчивость «экстремальности» климата. Так как экстремальность климата является одним из важнейших параметров для экономики и общества, и так как обнаружение долгопериодной изменчивости позволяет строить обоснованные прогнозы, полученные результаты позволяют говорить о «скрытой» долгопериодной изменчивости как о важнейшей характеристике реконструкций на основе ДКД.

Глава 7. Сравнение древесно-кольцевых данных с данными низкого разрешения. Синтез данных различного разрешения

Как отмечено в главе 1 диссертации, древесно-кольцевые данные часто критикуются за их неспособность или ограниченную возможность реконструировать долгопериодную изменчивость. Также были обозначены различные аспекты процесса построения дендроклиматических реконструкций, способные повлиять на восстановление долгопериодной климатической

информации. В главе 7 рассмотрены два вопроса, которым еще не было уделено достаточно внимания, а именно:

- 1) Как долгопериодная изменчивость в древесно-кольцевых данных соотносится с долгопериодной изменчивостью в косвенных данных о климате из других палеоархивов?
- 2) Как объединение древесно-кольцевых данных с косвенными данными других типов может помочь в восстановлении долгопериодной климатической изменчивости?

В работе Л. Клиппель и соавторов (Klippel et al. 2020) было показано, что если брать всю совокупность современных палеоархивов, использующихся для реконструкции температуры последних двух тысячелетий (PAGES Consortium 2017), доиндустриальные температурные тренды сильнее выражены именно в данных низкого разрешения. Но есть масса примеров, говорящих об обратном: древесно-кольцевые данные могут сохранять долгопериодную климатическую изменчивость наравне с другими палеоархивами. В главе 7 рассмотрены некоторые из этих примеров, а также обсуждается, какие именно свойства древесно-кольцевых данных могут влиять на сохранность долгопериодного сигнала.

Второй вопрос становится актуальным, если долгопериодная изменчивость все-таки не воспроизводится в достаточной степени на основе древесно-кольцевых данных. Это может быть следствием намеренной предварительно обработки ДКД, при которой долгопериодная изменчивость исключается из набора данных, чтобы ограничить реконструируемую изменчивость наиболее надежной частью спектра. Либо это может быть связано с принципиальными ограничениями набора ДКД, такими как наличие образцов только из живых деревьев, что методически ограничивает возможности реконструкции долгопериодной изменчивости. При этом древесно-кольцевые данные остаются незаменимым источником информации о межгодовой и декадной климатической изменчивости. Возникает необходимость объединения ДКД с другими косвенными источниками информации о климате прошлого (построение так называемых мульти-прокси реконструкций) для получения наиболее подробной реконструкции на разных частотах. В главе 7 приводится пример объединения косвенных данных разного типа для построения температурной реконструкции для северо-восточной Европы за последние два тысячелетия.

1. Температурная реконструкция для северо-восточной Европы.

Реконструкция среднегодовых температур на основе синтеза палеоклиматических данных разного разрешения, построенная в данном исследовании, представляет климатическую историю северо-восточной Европы. Регион исследования ограничен Кольским полуостровом на западе (40° в. д.), мысом Челюскин (полуостров Таймыр) на востоке (104° в. д.) и линией 60° с. ш. на юге.

Для построения реконструкции были использованы следующие прокси-данные: 1. Хронологии по ширине годовых колец деревьев — для детальной реконструкции краткосрочных климатических изменений; 2. Споро-пыльцевые данные из озерных отложений — для реконструкции долгопериодного климатического сигнала и уточнения его амплитуды; 3. Исторические данные — потенциально наиболее точный и подробный источник климатической информации, но охватывающий немногим более 500 лет. Сравнение итоговой реконструкции с рядом, основанным на инструментальных наблюдениях, показывает их хорошее соответствие (рис. 12). Коэффициент корреляции равен 0,81 для полного периода с 1815 г. и достигает значения 0,91, если рассматривать период с 1895 г., для которого доступны ряды многолетних наблюдений всех использованных метеостанций региона. Окончательный вариант реконструкции для Северо-Восточной Европы показан на рис. 12. В тексте диссертации подробно описана методика объединения и калибровки палеоклиматических данных для построения реконструкции.

Построенная реконструкция показывает высокую степень долгопериодной изменчивости на вековых временных масштабах. Спектральный анализ реконструкции на основе метода максимальной энтропии выявил статистически значимые циклы колебаний региональной температуры с периодами 499, 195 лет, 73, 48 и 24 года. Сопоставление этих периодов со спектральными характеристиками временных рядов различных солнечных индикаторов (Fyodorov et al. 1996), также содержащих колебания с периодами около 500 и 200 лет, позволяет предположить, что долговременные изменения солнечной активности могут быть одним из важнейших форсингов для температур исследованного региона. Эти периоды также совпадают с основными циклами, присутствующими в косвенных данных о климате среднего и позднего голоцена (Wanner et al. 2008).

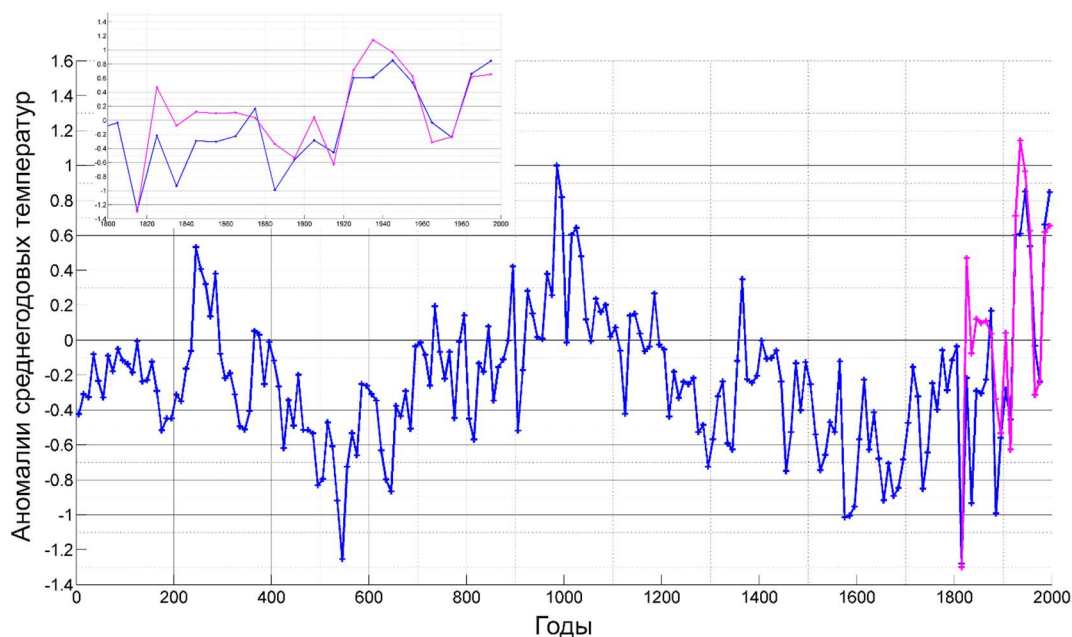


Рисунок 12 – Итоговая реконструкция аномалий средних декадных значений годовой температуры для северо-востока Европы (синий цвет) и инструментальные данные (красный цвет). Вставка использована для увеличения инструментального периода.

II. Характеристики реконструкции, полученной на основе синтеза палеоклиматических данных различного разрешения. Было проведено сравнение полученной реконструкции среднегодовой температуры с некоторыми другими реконструкциями. Для этого были использованы региональная (Kaufman et al. 2009) и пространственная (Werner et al. 2018) реконструкции для Арктики, а также реконструкции для Северного полушария (Клименко, 2009; Esper et al. 2002; Moberg et al. 2005) и для внетропических широт Северного полушария (30° – 90° с.ш.) (Ljungqvist 2010). Эти реконструкции, помимо того, что они охватывают различные регионы, основаны на различных наборах палеоклиматических данных и на разных методических подходах к их объединению.

Все рассмотренные реконструкции представляют следующие основные климатические события последних двух тысячелетий: римский оптимум (II и III вв.), холодную эпоху Великого переселения народов, также называемую позднеантичным малым ледниковым периодом (V и VI вв.), средневековый теплый период, также называемый климатическим оптимумом или аномалией (X–XII вв.), заметное похолодание малого ледникового периода (XIII–XIX вв.) и, наконец, современная теплая стадия (XX в.). Часто реконструкции совпадают

в деталях – все они показывают ярко выраженное потепление в конце X в., заметное потепление в конце XIV и XVIII вв., резкие похолодания 1450–1810-х гг. и т. д. Эти события часто связывают с крупными извержениями вулканов Куваэ (1453 г.) и Тамбора (1815 г.).

Самое близкое совпадение реконструкции для северо-восточной Европы было получено с одной из последних реконструкций для Арктики из работы (Werner et al. 2018), основанной на наиболее современной компиляции более 40 палеоархивов со всей Арктики и байесовской методике BARCAST. Коэффициент корреляции двух реконструкций декадного разрешения равен 0,69 для общего периода 5-1995 гг., а для периода после 750 г. н.э., для которого реконструкция (Werner et al. 2018) считается более надежной, коэффициент корреляции равен 0,81. Высокая согласованность построенной реконструкции с аналогичной реконструкцией, построенной на основе самых последних достижений палеоклиматологии, включая самые современные архивы данных и методику реконструкции, говорит о правильности выбранного в данном исследовании подхода.

III. Сравнение долгопериодной изменчивости в древесно-кольцевых данных с другими косвенными источниками информации о климате прошлого. В соответствующем разделе диссертации приведено несколько примеров, в которых древесно-кольцевые данные проявляют несомненные признаки сохранения долгопериодной климатической изменчивости. Наличие долгопериодной изменчивости обосновывается путем сравнения с другими типами косвенных данных о климате прошлого. Эти примеры приведены не только для того, чтобы указать на принципиальную возможность ДКД сохранять долгопериодный климатический сигнал – это в некоторой степени было показано в предыдущих главах, но и для того, чтобы попытаться обобщить их и выделить необходимые признаки ДКД для сохранения долгопериодной изменчивости.

Первый пример – реконструкция летних температур в северной Фенноскандии за два последних тысячелетия на основе максимальной плотности годовых колец сосны (Esper et al. 2012b). В этой реконструкции впервые для древесно-кольцевых данных был обнаружен значимый тренд понижения температуры за период 138 г. до н.э. – 1900 г. н.э. со скоростью -0.31 °C за 1000 лет, что хорошо согласовывалось с соответствующими оценками по палеоархивам низкого разрешения. Второй пример – реконструкция засушливости летнего периода в центральной Европе на основе стабильных изотопов углерода и кислорода годичного разрешения за период 75 г. до н.э. –

2018 г. н.э., где также был обнаружен значимый тренд усиления засушливости за весь период реконструкции (Büntgen et al. 2021b). Обе реконструкции объединяют две черты: весьма высокая для древесно-кольцевых данных климатическая чувствительность (корреляция с реконструированным параметром 0,73–0,77 за период более 100 лет) и беспрецедентная репликация полученных измерений. Возможно, именно с наличием этих двух качеств связана способность древесно-кольцевых данных сохранять информацию о догопериодной климатической изменчивости. Само по себе получение подобных наборов данных – все еще единичное явление. Мне видится, что именно поэтому вопрос о воспроизведении тысячелетних климатических трендов древесно-кольцевыми данными все еще активно обсуждается (Klippel et al. 2020) – просто из-за отсутствия достаточного количества качественных древесно-кольцевых данных, покрывающих длительные периоды.

Еще один пример – это реконструкция летней температуры северной Финляндии на основе оптической плотности годовых колец сосны за последние 7,5 тысяч лет (Helama et al. 2022). При сравнении долгопериодной изменчивости этой реконструкции с различными архивами низкого разрешения из Фенноскандии (Sundqvist et al. 2014) – пыльцевых, хирономидных и диатомовых, было показано, что величина угла наклона убывающего тренда очень близка для ДКД и суммы архивов низкого разрешения. Хотя сами авторы обсуждают возможные ограничения использования оптической плотности годовых колец сосны в качестве надежного индикатора долгопериодной изменчивости, приведенные результаты вселяют надежду на получение большего количества длительных дендроклиматических реконструкций из разных регионов земного шара, несущих новую информацию о долгопериодной климатической изменчивости в прошлом.

Глава 8. Прогнозы прироста

Принципиальная возможность долгопериодных изменений характеристик годовых колец деревьев, в том числе основной характеристики – ширины, показывающей скорость прироста биомассы, ставит вопрос о пределах этих изменений в некоторой популяции деревьев, непосредственно связанной как с климатическими изменениями, так и с условиями произрастания этих деревьев. Помимо использования этих данных для дендроклиматических реконструкций и реконструкций изменения биомассы, эти изменения могут быть использованы для прогнозирования прироста в будущем, что может быть основой для планирования устойчивого развития. При этом именно долгопериодные, а не

высокочастотные характеристики прогнозных изменений носят наибольший интерес, так как они представляют собой долговременные изменения средних значений прироста и могут быть связаны со значительными перестройками как самих древесных сообществ, так и всей экосистемы. В главе 8 приводятся несколько примеров прогнозирования прироста деревьев для разных пород и регионов на основе модели VS-Lite, обсуждаются преимущества и ограничения данной методики и полученные результаты.

Первый пример относится к прогнозированию прироста деревьев *N. macrcarpa* и *A. chilensis* в средиземноморских лесах центрального региона Чили (СЛЦЧ). Прогноз прироста был выполнен на основе упрощенной имитационной модели роста деревьев VS-Lite, для чего специально была разработана методика. Полученные результаты показывают (рис. 13), что прогнозируемое изменение климата по сценариям 2.6 и 8.5 окажет негативное влияние на единственные две древесные породы СЛЦЧ, произрастающие в горах, вероятно, вызвав сокращение лесов в региональном масштабе.

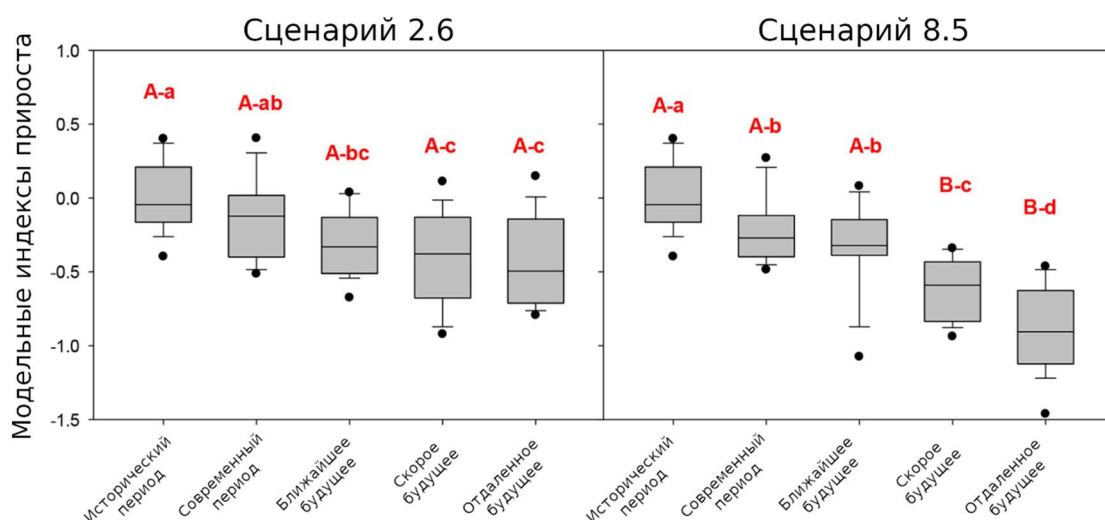


Рисунок 13 – Различия между прогнозируемыми приростами деревьев в 15-летние периоды для двух климатических сценариев: 2.6 (слева) и 8.5 (справа). Исторический период – 1950-2005 гг., современный период – 2006–2020 гг., ближайшее будущее – 2021–2035 гг., скорое будущее – 2036-2050 гг., отдаленное будущее – 2051–2065 гг. Разные буквы обозначают статистически значимые различия между индексами годовых колец по критерию Фишера ($p < 0,001$). Заглавными буквами отмечены различия между двумя сценариями в один и тот же период; строчными буквами отмечены различия между периодами для одного и того же сценария.

Ограничения использованного подхода. В данном исследовании основное внимание было уделено разработке методики прогнозирования прироста на основе упрощенной имитационной модели роста деревьев VS-Lite, позволяющей учитывать основополагающий принцип лимитирующих факторов. В условиях изменяющихся климатических условий учет этого принципа необходим для построения обоснованного прогноза. При этом распространенные линейные модели прогноза прироста на основе набора климатических предикторов (Pompa-García et al. 2017; Sánchez-Salguero et al. 2017) не учитывают этот принцип, и, судя по всему, не способны давать обоснованные прогнозы. Тем не менее, использованный в данном исследовании подход также имеет ограничения, которые необходимо упомянуть.

Одним из факторов, который не учитывается в модели VS-Lite, является накопление снега. Прогнозируемое уменьшение толщины снежного покрова и более раннее весеннее таяние в следующие десятилетия могут вызвать более раннее возобновление ксилогенеза и тем самым изменить начало и продолжительность вегетационного периода (Masiokas et al. 2006; González-Reyes et al. 2017), подвергая деревья риску воздействия поздних заморозков и более длительных периодов дефицита увлажнения (Arco Molina et al. 2019; Hadad et al. 2019). Также модель не учитывает возможное повышение эффективности использования воды, связанной с повышением концентрации углекислого газа в атмосфере, что приводит к возможности для растений держать устьица на листьях частично закрытыми и, таким образом, сокращать испарение, при этом получая достаточное количество углекислого газа для фотосинтеза. Одним из возможных способов преодоления некоторых из описанных ограничений является использование более сложных имитационных моделей (список потенциальных моделей см. в (Guiot et al. 2014)). Однако цена усложнения заключается в увеличении требований к исходным данным и сложности вычислений. Сравнительная простота модели VS-Lite также может быть преимуществом, особенно в случае ограниченной доступности данных для калибровки и верификации.

Одним из главных ограничений использования модели VS-Lite для прогнозирования прироста является отсутствие в ней верхних ограничений на климатические параметры, благоприятные для роста деревьев. Как слишком высокие температуры, так и повышенная влажность почвы негативно сказываются на приросте, что учтено в модели Ваганова-Шашкина с помощью введения дополнительных параметров предельных значений температуры и

влажности почвы, после которых прирост начинает уменьшаться, а затем останавливается (Ваганов, Шашкин 2000). В упрощенной реализации VS-Lite после достижения оптимальных значений климатических параметров прирост моделируется постоянным, несмотря на дальнейшее увеличение значений этих параметров. В проведенном исследовании данное ограничение не повлияло на результаты, так как в центральном регионе Чили прирост в основном ограничивается нехваткой увлажнения. В регионах, где основным лимитирующим фактором прироста является температура, отсутствие описанных ограничений может привести к нереалистичным прогнозам прироста с прогнозируемым монотонным повышением температуры в будущем.

Также во внимание должно приниматься, что модель VS-Lite не описывает снижение прироста из-за массовых вспышек насекомых или патогенов, хотя это часто связано с увеличением температуры и/или засухливости. Будущие сценарии изменения климата могут запускать или усиливать физиологические реакции, которые ускоряют или усиливают наблюдаемое снижение темпов прироста. Также модель не учитывает возможное отмирание деревьев.

Прогнозирование прироста в других регионах. После описания новой методики прогнозирования прироста на основе модели VS-Lite, обозначения основных ограничений ее использования, и применения разработанной методики для прогнозирования прироста эндемичных лесов средиземноморского типа в центральном регионе Чили (Matskovsky et al. 2021), эта методика была применена в других регионах и для других пород деревьев, чтобы оценить возможный диапазон ее использования. В частности, прогнозы прироста были выполнены для сосны обыкновенной в восточном Поволжье и для ели европейской на Соловецких островах. В Поволжье прирост сосны в основном ограничен условиями увлажнения (Kuznetsova and Solomina 2022), однако в данном регионе, в отличие от центрального региона Чили, не прогнозируется усиление засухливости, несмотря на прогнозируемое повышение температуры. Прогнозируемый прирост поэтому остается на исторических уровнях, и даже несколько возрастает, если в модели задается увеличенная длина вегетационного сезона в связи с повышением температур (Matskovsky et al. 2020b).

Основным лимитирующим фактором прироста для ели европейской на Соловецких островах является температура (Долгова и др. 2019). Прогнозы показывают значимое повышение прироста для обоих рассмотренных сценариев и для различных временных срезов (Matskovsky et al. 2020a). Тем не менее, как

уже упоминалось, в этом случае прогнозы на основе модели VS-Lite не могут считаться достаточно надежными, так как в ней не учтено возможное замедление прироста при достижении определенных пороговых значений температуры в будущем.

Для обобщения описанной методики прогнозирования, она была применена к глобальной базе данных древесно-кольцевых хронологий, описанной в работе (Breitenmoser et al. 2014). Результаты приведены на рисунке 14.

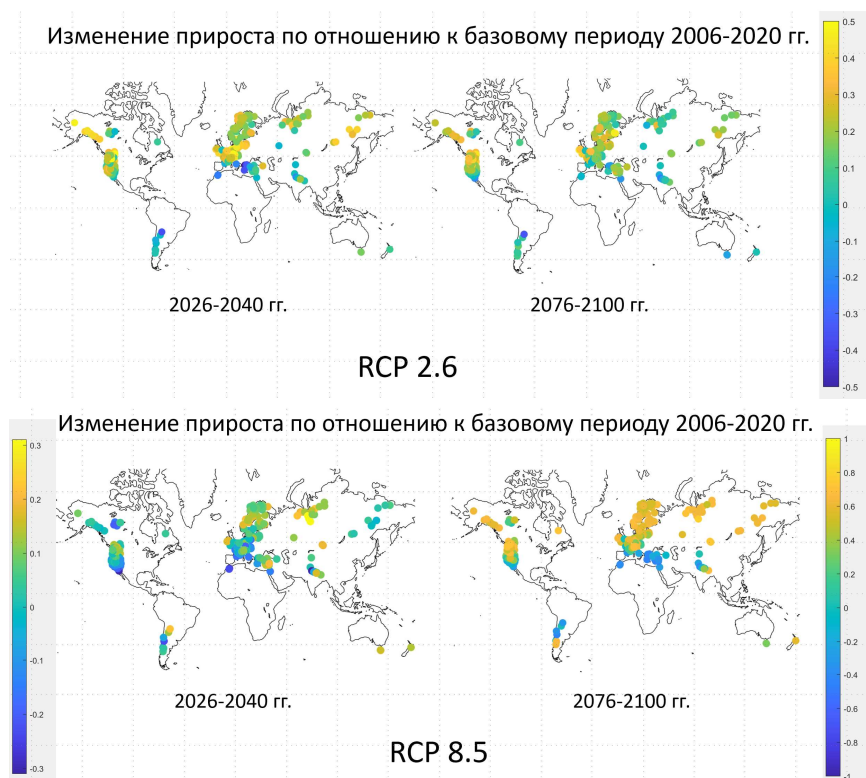


Рисунок 14 – Прогнозы изменения прироста на основе модели VS-Lite для глобальной сети древесно-кольцевых хронологий для сценария 2.6 (сверху) и сценария 8.5 (снизу). Цветом показано изменение модельного прироста для двух периодов: 2026–2040 гг. (слева) и 2076–2100 гг. (справа) по отношению к базовому периоду 2006–2020 гг. На нижней панели справа и слева значения для наглядности приведены в разных цветовых масштабах.

Показано, что можно выделить основные регионы с прогнозируемым увеличением и снижением прироста, а также оценить относительные аномалии прогнозируемых изменений в зависимости от выбранного сценария и рассматриваемого периода прогноза. При интерпретации результатов еще раз необходимо подчеркнуть важность учета всех описанных ограничений предложенной методики прогнозирования.

В проведенных расчетах были получены прогнозные значения прироста, в среднем статистически значимо отличающиеся от значений, рассчитанных на инструментальном периоде наблюдений. Это говорит о прогнозировании долговременных изменений в средних значениях прироста. Подобный прогноз может быть признан корректным только при условии признания возможности древесно-кольцевых данных содержать долгопериодную климатическую изменчивость. Таким образом, многие вопросы, поставленные в работе ранее, а также некоторые представленные решения также имеют непосредственное отношение к вопросу прогнозирования прироста деревьев в будущем, а значит и к вопросам влияния изменений климата на экосистемы и устойчивого развития в целом.

Основные выводы

- 1) Долговременные изменения параметров годовых колец, связанные с возрастом дерева, а также ограниченность жизни деревьев являются основными ограничениями для выделения долгопериодной климатической изменчивости из ДКД. Кроме этого, на реконструируемую долгопериодную изменчивость могут значительно влиять калибровка относительно инструментальных рядов наблюдений, соотношение сигнал/шум и наличие эффекта дивергенции.
- 2) Разработан метод построения климатических реконструкций на основе древесно-кольцевых данных (DIRECT), в котором учет камбиального возраста годовых колец включен в этап построения трансфер-функции для преобразования параметров годовых колец в оценки климатического параметра. Это позволяет избежать процесса стандартизации и, тем самым, не нарушать долгопериодный сигнал в древесно-кольцевых хронологиях. На основе метода DIRECT получены новые оценки летней температуры воздуха в северной Фенноскандии за последние два тысячелетия, которые несколько отличаются от предыдущих оценок на базе метода RCS, в особенности для 6-7 вв. и 10-11 вв. нашей эры. Показано наличие значимого отрицательного тренда летних температур северной Фенноскандии -0.27 °C за тысячу лет за период 17 г. до н.э. – 2006 г. н.э.
- 3) Показано, что долгопериодная климатическая изменчивость может содержаться в изменении во времени количества образцов с высокими и низкими значениями измеренных параметров годовых колец. Это говорит о необходимости учета структуры выборки в дендроклиматических исследованиях. Этот вывод также может свидетельствовать о том, что

древесно-кольцевые данные способны сохранять долгопериодную климатическую изменчивость даже при наличии эффекта дивергенции.

- 4) Разработанный метод удаления неклиматической компоненты из древесно-кольцевых хронологий, основанный на методе анализа сингулярного спектра, следует применять к хронологиям *N. pumilio* на Огненной Земле, а также к другим хронологиям, подверженным устойчивым периодическим событиям дефолиации (например, Larix в Альпах), для усиления климатического сигнала и для последующего использования этих хронологий в дендроклиматических реконструкциях. С использованием данной методики, а также на основе регрессии методом частных наименьших квадратов построена реконструкция летней температуры для Огненной Земли, охватывающая период 1765-2002 гг. и объясняющая от 37 до 50% изменчивости инструментального ряда температуры. Полученная реконструкция обладает весьма высокими показателями качества, особенно с учетом в целом умеренного климатического сигнала, содержащегося в ширине годовых колец в данном регионе. В полученной реконструкции содержится значимый отрицательный тренд -0.41 °C за сто лет.
- 5) Введено понятие «скрытой» долгопериодной изменчивости в ДКД – это долгопериодная изменчивость, не содержащаяся в изменении средних значений рядов ДКХ, но которую можно выделить из дополнительных характеристик этих рядов. На основе нескольких рядов реконструированных индексов засушливости для разных регионов показано, что такими характеристиками являются стандартное отклонение в скользящем окне и время возврата экстремальных событий. Следовательно, эти характеристики могут использоваться для изучения долгопериодных климатических изменений в прошлом даже на основе ДКД, ранее считавшихся неподходящими для этих целей. В частности, показано статистически значимый тренд усиления экстремальности условий увлажнения в Поволжье за последние 600 лет.
- 6) Сравнение полученной реконструкции среднегодовой температуры для северо-восточной Европы, основанной на объединении древесно-кольцевых, споро-пыльцевых и исторических данных, с некоторыми другими реконструкциями региона и полушария показывает, что такие крупномасштабные климатические события, как римский оптимум (II–III вв. н.э.), последующее похолодание периода Великого переселения народов (V–VI вв. н.э.), средневековая теплая эпоха (X–XII вв. н.э.), малый ледниковый

период (XIII–XIX вв. н.э.) и современный этап потепления (XX вв.) выражены как в полушарном, так и в региональном масштабах. А вот менее значительные декадные и мультидекадные климатические вариации в региональном масштабе могут существенно отличаться от общей климатической картины в полушарии.

- 7) Сильный климатический сигнал в измеренных параметрах годовых колец и высокая репликация измерений на всем протяжении интервала реконструкции являются основными требованиями для восстановления долгопериодной климатической изменчивости на основе древесно-кольцевых данных.
- 8) Разработана методика прогнозирования прироста на основе упрощенной имитационной модели роста деревьев VS-Lite. Эта методика является промежуточным звеном между линейными моделями, не являющимися реалистичными для прогноза из-за отсутствия имплементации принципа лимитирующих факторов и полноценными имитационными моделями, требующими большого набора входных данных, часто отсутствующих на практике. Методика использована для получения прогнозов прироста в 21-м веке в центральном регионе Чили, на Соловецких островах и в Поволжье. Показано наличие разнонаправленных долговременных трендов приростов в этих регионах.

Список основных публикаций по теме диссертации

Главы монографий

1. Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным / [О. Н. Соломина и др.]; под ред. О. Н. Соломиной. – М.-С-Пб.: Изд-во Нестор-История, 2017. – 258 с.

В научных изданиях, рекомендованных ВАК

2. Дендрохронология средневекового Новгорода: анализ хронологического и количественного распределения дендродат / О. А. Тарабардина, А. А. Карпухин, В. В. Мацковский, Л. Н. Соловьева // Краткие сообщения Института археологии. — 2016. — № 245. — С. 22–35.
3. Карпухин, А. А. Абсолютная генерализированная дендрохронологическая шкала бассейнов рек Шексна и Сухона (1085–2009 гг.) / А. А. Карпухин, В. В. Мацковский. // Российская археология. – 2014. – № 2. – С. 76-87.
4. Комбинированное дендрохронологическое и радиоуглеродное датирование шести русских икон XV-XVII вв. / А. В. Долгих, В. В. Мацковский, К. В.

- Воронин, О. Н. Соломина // Доклады Академии наук. 2017. – №. 474. – С. 737-740.
5. Мацковский, В. В. Оценка смещений в RCS-хронологиях древесных колец / В. В. Мацковский // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2011. – № 4. С. 389-404.
 6. Попова В.В., Мацковский В.В., Михайлов А.Ю. Современные изменения климата суши внетропической зоны Северного полушария / В. В. Попова, В. В. Мацковский, А.Ю. Михайлов // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2018. – № 1. – С. 3-13.
 7. Пространственная изменчивость прироста сосны на соловецких островах / Е. А. Долгова, О. Н. Соломина, В. В. Мацковский. [и др.]. // Известия РАН. Серия географическая. – 2019. – Вып. 630. – С. 42-50.
 8. Estimated influence of extreme climate events in the 21st century on the radial growth of pine trees in Povolzhie region (European Russia) / V. Matskovsky, V. Kuznetsova, P. Morozova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020a. – Vol. 611. – № 1.
 9. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium / O. Solomina, I. Bushueva, E. Dolgova [et al.]. // Global and Planetary Change. — 2016. — Vol. 140. — P. 28–58.
 10. Helama S. Comment on “Absence of Age-Related Trends in Stable Oxygen Isotope Ratios From Oak Tree Rings” by Duffy et al. (2019) / S. Helama, V. V. Matskovsky // Global Biogeochemical Cycles. – 2020. – Vol. 34. – № 2. – P. 10-12.
 11. Klimenko V. Multi-archive temperature reconstruction of the Russian Arctic for the past two millennia / V. Klimenko, V. Matskovsky, D. Dalmann. // Geography, Environment, Sustainability. – 2014. – № 1. – P. 16-29.
 12. Matskovsky V. Climatic signal in tree-ring width chronologies of conifers in European Russia / V. Matskovsky // International Journal of Climatology. – 2016. – Vol. 36. – № 9. – P. 3398-3406.
 13. Matskovsky V. Combined dendrochronological and radiocarbon dating of three Russian icons from the 15th-17th century / V. Matskovsky, A. Dolgikh, K. Voronin // Dendrochronologia. – 2016. – Vol. 39. – P. 60-68.
 14. Matskovsky V. Direct transformation of tree-ring measurements into palaeoclimate reconstructions in three-dimensional space / V. Matskovsky, S. Helama // Holocene. – 2016. – Vol. 26. – № 3. – P. 439-449.
 15. Matskovsky V. Removal of a non-climatically induced seven-year cycle from *Nothofagus pumilio* tree-ring width chronologies from Tierra del Fuego,

- Argentina for their use in climate reconstructions / V. Matskovsky, F. A. Roig, G. M. Pastur // *Dendrochronologia*. – 2019. – Vol. 57. – P. 125610.
16. Matskovsky V. V. Testing long-term summer temperature reconstruction based on maximum density chronologies obtained by reanalysis of tree-ring data sets from northernmost Sweden and Finland / V. V. Matskovsky, S. Helama // *Climate of the Past*. – 2014. – Vol. 10. – № 4.
 17. Matveev S. The intensity of the climatic signal in the dynamics of the increment of Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) of the Khrenovskii forest (Voronezh region, Russia) / S. Matveev, D. Timashchuk, V. Matskovsky. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012017.
 18. Radial growth projections for spruce on Solovetskiye Islands, the White Sea, for the 21st century / V. Matskovsky, E. Dolgova, P. Morozova [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020b. – Vol. 438. – № 1.
 19. Recurrent transitions to Little Ice Age-like climatic regimes over the Holocene / S. Helama, M. Stoffel, R. J. Hall [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2021.
 20. Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century / M. S. Morales, E. R. Cook, J. Barichivich [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2020.
 21. Solomina O. Dendrochronology in European Russia in the Early 21st Century: State of the Art / O. Solomina, V. Matskovsky // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2021. – Vol. 9. – P. 1-8.
 22. Summer temperature changes in Tierra del Fuego since AD 1765: atmospheric drivers and tree-ring reconstruction from the southernmost forests of the world / V. Matskovsky, F. A. Roig, M. Fuentes [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2022.
 23. The European Russia Drought Atlas (1400–2016 CE) / E. R. Cook, O. Solomina, V. Matskovsky [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2020.
 24. Tree-ring-based hydroclimatic reconstruction for the northwest Argentine Patagonia since 1055 CE and its teleconnection to large-scale atmospheric circulation / M. A. Hadad, Á. González-Reyes, F. A. Roig [et al.] // *Global and Planetary Change*. – 2021. – Vol. 202. – P. 103496.
 25. Tree-ring data set for dendroclimatic reconstructions and dendrochronological dating in European Russia / O. Solomina, V. Matskovsky, E. Dolgova [et al.]. – 2022.
 26. Tree growth decline as a response to projected climate change in the 21st century in Mediterranean mountain forests of Chile / V. Matskovsky, A. Venegas-González, R. Garreaud [et al.] // *Global and Planetary Change*. – 2021. – Vol. 198. – P. 103406.