

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт географии Российской академии наук

*на правах рукописи*

Мацковский Владимир Владимирович

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

Специальность 1.6.14. – Геоморфология и палеогеография

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора географических наук

Научный консультант:  
доктор географических наук, член-корреспондент РАН  
Соломина Ольга Николаевна

Москва – 2022

## Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>9</b>
Цель работы.....	10
Задачи.....	10
Положения, выносимые на защиту.....	11
Научная новизна работы.....	12
Теоретическая и практическая значимость.....	12
Личный вклад автора.....	13
Апробация работы и публикации.....	13
Структура и объем диссертации.....	14
Благодарности.....	14
<b>Глава 1. Постановка проблемы.....</b>	<b>15</b>
1.1 Место древесно-кольцевых данных в палеоклиматологии.....	15
1.2 Возрастные тренды в сериях измерений параметров годовых колец и их влияние на реконструкцию долгопериодной климатической изменчивости.....	19
1.3 Методы стандартизации в дендроклиматологии.....	20
1.3.1 Детерминистские методы стандартизации.....	23
1.3.2 Стандартизация региональной кривой роста (RCS).....	24
1.3.3 Возможные смещения RCS хронологий.....	26
1.3.4 Современные тенденции развития методов стандартизации.....	28
1.4 Важность периода калибровки для восстановления долгопериодной изменчивости.....	30
1.5 Дивергенция и нарушения принципа униформизма.....	32
1.6 Проблема соотношения долгопериодной и высокочастотной изменчивости.....	35

1.7 Выводы к главе 1 .....	41
<b>Глава 2. Методы стандартизации, сохраняющие долгопериодную изменчивость в древесно-кольцевых данных.....</b>	<b>45</b>
2.1 Методика экспериментов .....	45
2.1.1 Используемые методы стандартизации .....	45
2.1.2 Сравнение на наборах реальных данных.....	51
2.1.3 Сравнение на модельных данных.....	53
2.2 Результаты и их обсуждение.....	54
2.2.1 Сравнение хронологий ширины и максимальной плотности годовичных колец для Торнетреска .....	54
2.2.2 Сравнение хронологий ширины годовичных колец для Торнетреска и северной Финляндии.....	57
2.2.3 Сравнение хронологий максимальной плотности годовичных колец для Торнетреска и северной Финляндии .....	60
2.2.4 Моделирование с заданным сигналом .....	62
2.3 Выводы к главе 2.....	65
<b>Глава 3. Метод прямой реконструкции DIRECT – альтернатива стандартизации .....</b>	<b>66</b>
3.1 Введение.....	66
3.2 Материалы и методы .....	67
3.2.1 Древесно-кольцевые данные.....	67
3.2.2 Основная концепция и описание метода DIRECT.....	67
3.2.3 Оценка неопределенностей реконструированных значений .....	72

3.2.4 Калибровка и верификация .....	72
3.2.5 Оценка долгосрочных тенденций изменения температуры .....	73
3.2.6 Сравнение с реконструкцией температуры на основе RCS .....	73
3.3 Результаты .....	74
3.3.1 Отклик максимальной плотности на температуру в зависимости от возраста .....	74
3.3.2 Реконструкция температуры на основе метода DIRECT .....	75
3.3.3 Сравнение реконструкций на основе методов DIRECT и RCS .....	80
3.3.4 Сравнение долгосрочных температурных трендов .....	81
3.4 Обсуждение результатов .....	83
3.4.1 Преимущества метода DIRECT .....	83
3.4.2 Ограничения метода DIRECT .....	84
3.4.3 Новые данные об изменении летних температур в Фенноскандии за два тысячелетия .....	85
3.5 Выводы к главе 3 .....	88
<b>Глава 4. Удаление периодического сигнала неклиматической природы.....</b>	<b>90</b>
4.1 Введение.....	90
4.2 Материалы и методы .....	92
4.2.1 Древесно-кольцевые хронологии .....	92
4.2.2 Климатические данные.....	93
4.2.3 Процедура удаления периодического сигнала.....	93
4.2.4 Анализ климатического отклика и его стабильности.....	100

4.2.5 Моделирование прироста на основе VS-Lite.....	100
4.2.7 Измерение семеношения .....	100
4.3 Результаты .....	101
4.2.6 Реакция прироста на дефолиацию.....	101
4.3.1 Климатический отклик исходных и скорректированных хронологий .....	101
4.3.2 Моделирование прироста на основе VS-Lite.....	103
4.3.3 Непосредственное наблюдение за деревьями после дефолиации и за семеношением.....	106
4.4 Обсуждение результатов .....	108
4.5 Выводы к главе 4.....	113
<b>Глава 5. Долгопериодная изменчивость летней температуры на Огненной Земле по дендрохронологическим данным .....</b>	<b>115</b>
5.1 Введение.....	115
5.2 Материалы и методы .....	117
5.2.1 Наборы климатических данных.....	117
5.2.2 Древесно-кольцевые данные и построение хронологий .....	118
5.2.3 Методика построения реконструкции .....	119
5.3 Результаты .....	124
5.3.1 Сравнение регрессии методом частных наименьших квадратов и регрессии на главные компоненты .....	124
5.3.2 Реконструкция летней температуры на Огненной Земле с 1765 г. ....	126
5.3.3 Колебания летней температуры на Огненной Земле и их причины .....	131

5.4 Обсуждение результатов .....	136
5.4.1 Региональные и полушарные факторы, влияющие на изменчивость летних температур на Огненной Земле .....	136
5.4.2 Регрессия методом частных наименьших квадратов как замена регрессии на главные компоненты в дендроклиматических реконструкциях .....	138
5.4.3 Сравнение с другими региональными реконструкциями температуры и долгопериодная изменчивость в них .....	140
5.5 Выводы к главе 5 .....	144
<b>Глава 6. Скрытая долгопериодная изменчивость в древесно-кольцевых данных</b> .....	<b>145</b>
6.1 Материалы и методы .....	145
6.1.1 Используемые наборы климатических данных .....	145
6.1.2 Древесно-кольцевые данные .....	146
6.1.3 Стандартизация древесно-кольцевых данных .....	148
6.1.4 Ансамблевая поточечная регрессия .....	148
6.1.5 Калибровка и верификация реконструкции .....	151
6.1.6 Сглаживание пространственной реконструкции .....	151
6.1.7 Рассмотренные характеристики рядов .....	153
6.2 Результаты и их обсуждение .....	153
6.2.1 Калибровка и верификация .....	153
6.2.3 Долгопериодная изменчивость в рядах засушливости для Поволжья .....	154
6.2.4 Долгопериодная изменчивость в рядах засушливости для Южной Америки .....	157

6.3 Выводы к главе 6.....	162
<b>Глава 7. Сравнение древесно-кольцевых данных с данными низкого разрешения. Синтез данных различного разрешения .....</b>	<b>163</b>
7.1 Введение.....	163
7.2 Материалы и методы .....	164
7.2.1 Регион исследования.....	164
7.2.2 Косвенные данные о климате прошлого.....	166
7.2.3 Инструментальные данные .....	169
7.2.4 Объединение различных типов косвенных данных .....	170
7.2.5 Построение реконструкции.....	172
7.3 Реконструкция температуры для северо-восточной Европы.....	174
7.4 Характеристики реконструкции, полученной на основе синтеза палеоклиматических данных различного разрешения .....	176
7.5 Сравнение долгопериодной изменчивости в древесно-кольцевых данных с другими косвенными источниками информации о климате прошлого .....	182
7.6 Выводы к главе 7 .....	188
<b>Глава 8. Прогнозы прироста.....</b>	<b>190</b>
8.1 Введение.....	190
8.2 Материалы и методы .....	194
8.2.1 Район исследования и особенности исследованных пород деревьев .....	194
8.2.2 Древесно-кольцевые хронологии .....	195
8.2.3 Описание модели VS-Lite.....	198
8.2.4 Оценка влияния климата на прирост .....	200

8.2.5 Прогнозирование прироста .....	200
8.3. Результаты .....	202
8.3.1 Калибровка и валидация модели VS-Lite .....	202
8.3.2 Влияние климата на прирост на основе моделирования VS-Lite.....	204
8.3.3 Прогнозы прироста .....	205
8.4 Обсуждение результатов .....	210
8.4.1 Климатический отклик ДКХ в центральном регионе Чили.....	210
8.4.2. Современная и будущая изменчивость климата в центральном регионе Чили и ее последствия для лесов .....	211
8.4.3 Ожидаемое изменение растительности в реликтовых лесах центральной части Чили.....	213
8.4.4 Ограничения использованного подхода .....	213
8.4.5 Прогнозирование прироста в других регионах .....	216
8.5. Выводы к главе 8.....	221
<b>Заключение.....</b>	<b>222</b>
<b>Основные выводы.....</b>	<b>224</b>
<b>Словарь использованных терминов .....</b>	<b>227</b>
<b>Список сокращений.....</b>	<b>230</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>234</b>
<b>Приложение.....</b>	<b>271</b>



## Введение

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; Хантемиров и др. 2021). Этим же принципом пользуются и для датирования кораллов, раковин двустворчатых моллюсков, сталагмитов и ленточных глин (например, Helama et al. 2009b). 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), о глобальных похолоданиях, наступающих после крупных вулканических извержений (D'Arrigo et al. 2013), о неодновременности и пространственной неоднородности проявления мультидекадных потеплений и похолоданий последнего тысячелетия (Neukom et al. 2019), о существенном влиянии на колебания климата в прошлом внутренней климатической изменчивости – Эль-Ниньо, Северо-атлантического колебания, Тихоокеанского декадного колебания и Антарктического колебания (D'Arrigo and Jacoby 1991; Cook et al. 1998; D'Arrigo et al. 2001; Jones and Widmann 2003).

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 дендрохронологический 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 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.

## **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 присутствующих 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.

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

- 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  $-0.27^{\circ}\text{C}$  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  $-0.41^{\circ}\text{C}$  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.ncei.noaa.gov/products/paleoclimatology/tree-ring>), а построенные реконструкции – в международном архиве палеоклиматических реконструкций (<https://www.ncei.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 Богородица 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 Красноярске), 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 представлены 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 ААГ 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.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность научному консультанту и многолетнему вдохновителю Ольге Николаевне Соломиной, а также коллегам по лаборатории и институту, всегда создающим прекрасную атмосферу для проведения научных исследований: Е.А. Долговой, В.В. Кузнецовой, Н.С. Семеняк, М.Ю. Александрину, Р.Р. Бичурину, Е.Ю. Ждановой, А.В. Долгих и другим. Автор признателен соавторам за плодотворные дискуссии во время подготовки и написания научных статей: С. Хеламе (S. Helama), Ф. Ройгу (F.A. Roig), Р. Гарпо (R. Garreaud), В.В. Клименко, А. Венегасу-Госналесу (A. Venegas-González), Пини (M. Moralez), М. Ададу (M. Hadad), И. Корневой, Э. Куку (E. Cook). Автор благодарит А.В. Панина и А.Ф. Глазовского за ценные комментарии к раннему варианту текста диссертации.

Работа проведена при финансовой поддержке гранта РФФИ (12-05-31126), грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-7354.2013.5, МК-7865.2016.6 и МК-3844.2019.5), грантов РНФ (21-17-00264, 14-17-00645 под руководством О.Н. Соломиной, 17-77-20123 под руководством Е.А. Долговой), Мегагранта на создание Международной лаборатории палеоэкологических реконструкций (№075-15-2021-599 под руководством М. Леграна), Национального совета по науке и технологиям Аргентины (CONICET) и фонда Гумбольдта.

## **Глава 1. Постановка проблемы**

### **1.1 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.

Известны основные климатические тенденции кайнозоя – текущей эры геологической истории Земли, т. е. последних 66 млн лет. Это постепенное похолодание (с термическим максимумом около 50 млн лет назад) и переход к ледниково-межледниковым циклам плейстоцена примерно 2,5 млн лет назад с периодом около 40 тыс. лет вначале и последующим переходом к 100-тысячелетним циклам примерно 800 тыс. лет назад. Сейчас мы живем в голоцене – начале нового ледниково-межледникового цикла, в его межледниковой фазе, начавшейся около 12 тыс. лет назад. Изменения климата в голоцене характеризовались резким потеплением в первые ~ 2 тыс. лет, достижением оптимума в период около 10-6 тыс. лет назад и последующим постепенным похолоданием вплоть до начала индустриального периода, обычно маркируемого 1850 годом.

Период после 1850 года отличается от предыдущих эпох наличием метеорологических наблюдений – то есть это период, на протяжении которого довольно точно известно, как происходило глобальное изменение приземной температуры воздуха. Последнюю половину 19 века средняя глобальная температура поверхности суши и океана колебалась вокруг среднего  $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  по отношению к среднему за период 1961-1990 гг., после чего началось резкое потепление со средним значением в первое десятилетие 21 века около  $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  по отношению к тому же периоду (IPCC 2014).

За исключением нескольких рядов ранних метеорологических наблюдений из Европы (Peterson and Vose 1997), информацию об изменениях климата до 1850 года можно получить только из косвенных источников информации (прокси-данных). Эта информация необходима для постановки современного потепления в долговременный контекст климатических изменений и ответа на вопрос об их соотношении с предыдущими климатическими эпохами. В свою очередь, эти знания важны для понимания

функционирования климатической системы в целом, а следовательно, для улучшения климатических прогнозов и, таким образом, формирования надежного базиса для стратегий устойчивого экономического, социокультурного и экологического развития.

В число вопросов, на которые невозможно ответить без привлечения косвенных данных о климате прошлого, входят соотношение современных глобальных температур с температурами средневековой климатической аномалии (СКА) и оптимума голоцена, соотношение различных внешних форсингов (колебаний инсоляции и вулканической активности, содержания углекислого газа в атмосфере) и внутренней климатической изменчивости, тренды, периодичность и амплитуда климатической изменчивости на различных временных масштабах. Очевидно, что все эти вопросы являются ключевыми для прогнозирования климата в ближайшем и отдаленном будущем.

Основные источники косвенных данных о климате прошлого – это ледники, озерные и морские отложения, натечные пещерные отложения, почвенные разрезы и годовые кольца деревьев. Все они различаются по разрешающей способности во времени, точности хронологической привязки и длине интервала покрытия. Из различных прокси-данных годовые кольца деревьев выделяются своей уникальностью – это высокое разрешение (год, сезон, и даже неделя), точность датировки и повторяемость, т. е. получение информации об одних и тех же событиях на основе нескольких организмов, живших в это время.

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. Тем не менее, 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). 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 данной работе будут рассмотрены временные периоды не длиннее 7,5 тысяч лет, т.е. климатические изменения в среднем и позднем голоцене. Важнейшим вопросом, относящимся к данному периоду, является, к примеру, соотношение температур в наиболее теплые и холодные его интервалы (оптимум голоцена, событие 4,2 тыс. лет назад, римский оптимум, позднеантичное похолодание, средневековая климатическая аномалия, малый ледниковый период, современное потепление), а также их пространственная выраженность и гомогенность. Другим важнейшим вопросом, ответ на который могут дать, возможно, только древесно-кольцевые данные, являются кратковременные и долговременные климатические последствия сильнейших вулканических извержений (Jones et al. 2013; Matskovsky and Helama 2016b; Churakova et al. 2019). Поскольку выброс сульфатных аэрозолей в стратосферу является одним из сильнейших климатических форсингов (Cole-Dai 2010), изучение климатических последствий крупнейших вулканических извержений последних тысячелетий является первостепенной задачей. Еще один важный вопрос – наличие периодичности в рядах климатических параметров и их основные периоды. Совпадение периодов с известными периодичностями форсингов может говорить о причинно-следственных связях между форсингами и конкретными региональными и глобальными климатическими изменениями (Wanner et al. 2008).

Как уже было отмечено, повторность, определяемая возможностью измерения параметров колец нескольких деревьев, живших в одно время, и вытекающая из нее точность хронологической привязки в рядах ДКД являются одной из главных и уникальных особенностей этих прокси. Многие исследователи отмечают падение точности датировок различных палеоархивов при продвижении в прошлое (см., например, Büntgen et al. 2022), что неизбежно приводит и к падению их разрешающей способности, а значит и к сглаживанию амплитуды реконструируемых климатических изменений. Это искусственное плавное снижение амплитуды, в том числе при объединении прокси-данных различного разрешения, может приводить к неверным выводам об изменениях климата в прошлом (У. Бюнтген, сообщение на РусДендро 2021). Несмотря на сомнения некоторых исследователей насчет точности хронологической привязки древесно-кольцевых данных (Mann et al. 2012), недавнее исследование по поиску известных радиоуглеродных пиков в отдельных годовых кольцах подтвердило годовую точность 44 древесно-кольцевых архивов из разных уголков нашей планеты начиная, по крайней мере, с 774 и 993 гг. н.э.

(Büntgen et al. 2018). А точность датирования длиннейших ДКХ Ирландии, США, Швейцарии и России была независимо подтверждена на протяжении более чем 9000 тыс. лет (Brehm et al. 2021). Таким образом, ДКД еще раз подтвердили непревзойденную точность хронологической привязки.

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 выражают сомнения в способности древесно-кольцевых данных сохранять долгопериодную изменчивость (Broske 2001), а другие указывают на ограничения традиционных древесно-кольцевых данных, таких как ширина и максимальная плотность годовичных 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).

Чтобы исследовать долгопериодную климатическую изменчивость, прежде всего нужно определиться с характерными временными периодами. Как уже было сказано выше, древесно-кольцевые данные позволяют исследовать климатические изменения в основном в позднем голоцене. Таким образом, при исследовании долгопериодной климатической изменчивости в древесно-кольцевых данных, будут подразумеваться изменения с характерным периодом колебаний *первые сотни – первые тысячи лет*. В рамках данной работы для унификации *долгопериодными будут считаться 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*. Здесь необходимо заметить, что тренд, присутствующий на всей длине ряда, в свою очередь, может быть частью цикла с периодом, превышающим двойную длину ряда.

## **1.2 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 годовых 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. В одной из последних статей У. Бюнтген (Büntgen 2022) предлагает для улучшения понимания долгопериодной климатической изменчивости на основе древесно-кольцевых данных сконцентрироваться на тех параметрах годовых колец, которые не зависят от роста дерева (от его размера и возраста), а именно на соотношении стабильных изотопов в древесине. Тем не менее, по поводу «независимости» содержания стабильных изотопов от роста дерева до сих пор ведется дискуссия (Helama and Matskovsky 2020; McCarroll et al. 2020), а для интерпретации записанного сигнала в этих параметрах годовых колец может потребоваться использование эко-физиологических моделей (Churakova Sidorova et al. 2016). Недавно 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, что, естественно, влияет на калибровку данных по инструментальным наблюдениям, 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. Хотя пока рано говорить об отсутствии необходимости стандартизации серий измерений анатомических показателей, в исследовании для сосны обыкновенной из северо-западной Финляндии было показано, что даже необработанные серии измерений сохраняют положительный тренд на протяжении инструментального периода, хорошо соотносящийся с трендом в инструментальных измерениях температуры (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 годовых 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).

### **1.3 Методы стандартизации в дендроклиматологии**

Поскольку деревья являются живыми организмами и, соответственно, обладают способностью адаптироваться к меняющимся условиям окружающей среды, а также из-за того, что они могут иметь разную скорость прироста (и другие количественные показатели годовых колец) в разных условиях произрастания, получение однородной климатической информации из разных поколений деревьев может являться проблемой. Это становится особенно актуально при проведении палеоклиматических исследований, в которых число исследуемых организмов (деревьев) обычно невелико из-за сложности их поиска и добычи (Briffa and Melvin 2011).

Значительная доля низкочастотной изменчивости параметров годовых колец не связана с климатом (von Storch et al. 2004; Esper et al. 2005; Fonti et al. 2009). Происхождение этой не связанной с климатом изменчивости можно разделить на несколько категорий: 1) тенденции связанные с возрастом или размером дерева (Biondi and Qeadan 2008; Carrer et al. 2014); 2) продолжительная реакция на кратковременные изменения окружающей среды, связанная с эффектами биологической памяти (Cook 1985; Esper et al. 2015), т.е. возникающие в результате физиологических процессов, в которых, например, накопление углеводов разделено во времени с их использованием для построения древесины (DeSoto et al. 2016; Büntgen et al. 2017); 3) нарушения роста деревьев в результате сильных ветров, вспышек насекомых-вредителей, лесных пожаров и других внешних воздействий (Rydval et al. 2015). Также могут играть роль неравномерности в структуре выборки, состоящей из живых и умерших деревьев, связанной с разной вероятностью отбора молодых и старых деревьев, а также медленно- и быстрорастущих деревьев. (Melvin 2004). Влияние некоторых факторов может быть минимизировано во время полевых работ (Lamarche et al. 1982; Cook and Kairiukstis 1990), тогда как с таким фактором, как возрастные тренды в сериях, приходится бороться с помощью методов стандартизации. Методы стандартизации в дендроклиматологии, в частности, призваны разделить неклиматические и климатический сигналы в древесно-кольцевых данных на всех частотах – от высоких до низких.

Исторически, развитие методов стандартизации в дендроклиматологии можно разделить на несколько периодов, которые неразрывно связаны развитием палеоклиматологии в целом. Первый период продолжался с самого начала дендроклиматических исследований в первой четверти 20-го века и до конца 1980-х годов, и в нем господствовали так называемые «детерминистские» методы стандартизации, в которых возрастной тренд определяется для индивидуальных серий измерений, то есть для каждого дерева. Следующий период – 1990-е – 2000-е годы – связан с осознанием ограниченных возможностей детерминистских методов в восстановлении долгопериодной составляющей климатического сигнала (Briffa et al., 1992; Cook et al., 1995). Оно привело к развитию и активному использованию методов стандартизации на основе региональной кривой роста (далее RCS, Regional Curve Standardization). Развитие методов стандартизации в последние два десятилетия связано с дальнейшей эволюцией палеоклиматологии. Сейчас становится очевидным, что стандартизация – это лишь часть процесса климатической

реконструкции, и ее нельзя изолировать от остальных этапов процесса. Этому пониманию обязано появление методов, призванных учесть особенности различного отклика параметров годичного кольца в зависимости от биологического возраста дерева, но при этом не ограничивающихся работой с сериями измерений годичных колец, а также учитывающих климатическую и географическую информацию, например иерархических методов, объединяющих стандартизацию измерений и построение трансфер-функции.

В научной литературе на данный момент отсутствует всеобъемлющий обзор на тему методов стандартизации в дендроклиматологии. В данном разделе обобщены сведения по тематике дендрохронологической стандартизации, описывающие современное состояние в этой области, а также основные этапы и направления ее развития. Рассмотрены основные группы методов стандартизации, используемые сегодня в дендроклиматических исследованиях – «детерминистские» методы, различные модификации метода RCS, а также новые концепции в этой области.

Как уже было упомянуто, в основе стандартизации серий ширины годичных колец деревьев лежит тот факт, что при взрослении дерева и увеличении его размера, ширина годичного кольца, как правило, уменьшается вдоль поперечного радиуса, в основном из-за геометрического ограничения на добавление новых слоев древесины по увеличивающейся поверхности (Fritts 1976; Cook 1987). У светолюбивых и отдельно растущих деревьев (несомкнутый древостой), этот тренд преобладает на протяжении всей жизни дерева (Helama et al. 2005a; Kershaw et al. 2016). У теневыносливых деревьев сомкнутых древостоев период уменьшения ширины колец обычно начинается после того, как дерево становится доминантным, и, как правило, ему предшествуют один или более периодов подавления и ускорения роста во время нахождения дерева в нижних ярусах (Canham 1990; Fraver and White 2005; Piovesan et al. 2005).

Еще одна неоднородность, связанная с возрастом дерева – это увеличение межгодовой изменчивости ширины годичных колец при увеличении ее абсолютных значений (Cook and Kairiukstis 1990). В литературе был предложен целый ряд методов для устранения неоднородности изменения прироста с возрастом и в среднем, и в разбросе, присущей индивидуальным деревьям, т.е. для «стандартизации» серий ширины годичных колец перед их объединением в мастер-хронологию (Cook and Kairiukstis 1990; Warren and Leblanc 1990; Biondi 1993). Большинство из этих методов предусматривают избавление от

биологического тренда посредством подбора сглаживающей кривой к индивидуальным сериям измерений параметров годичных колец. Э. Куком (Cook 1985) была разработана общая математическая модель «классической» дендрохронологической стандартизации, когда возрастной тренд определяется для индивидуальных серий измерений. Ее описание на русском языке можно найти в книге (Ваганов и др. 1996, стр. 39-44).

Хотя методы стандартизации изначально разрабатывались для серий измерений ширины годичных колец деревьев, в других характеристиках годичных колец, таких как максимальная плотность, оптическая плотность, и других, также наблюдается биологический тренд, а значит существует необходимость в стандартизации измерений.

### **1.3.1 Детерминистские методы стандартизации**

Детерминистские методы стандартизации названы так из-за использования для удаления возрастного тренда из серий измерений годичных колец некоего заранее определенного, или детерминированного, вида функции. Это определение относится к группе методов, объединенных тем общим свойством, что подбор выбранной функции производится к каждой серии измерений по отдельности. В качестве выбранной функции чаще всего выступает отрицательная экспонента, линейная функция, функция Хугерсхоффа (экспоненциальная функция, имитирующая кратковременный период увеличения прироста у молодых деревьев с последующим снижением), либо кубический сглаживающий сплайн (Cook and Peters 1981).

Как было показано в работе Э. Кука и соавторов (Cook et al. 1995), использование детерминистских методов стандартизации приводит к так называемому «проклятию длины сегмента» (Segment Length Curse) – принципиальной невозможности восстановления долгопериодной изменчивости с периодом в два раза превышающим длину индивидуальных серий измерений. Это связано с приведением всех серий измерений к единому среднему значению и вытекающего из этого сглаживания изменчивости итогового временного ряда. Эта группа методов, тем не менее, является широко используемой для построения древесно-кольцевых хронологий, а при большом возрасте использованных деревьев позволяет восстанавливать климатическую изменчивость на соответствующих периодах. В главе 5 на конкретном примере будет показано, что климатические реконструкции, основанные на хронологиях, построенных с использованием

детерминистских методов стандартизации, могут содержать долгопериодный климатический сигнал (в смысле определения, данного в конце раздела 1.1). В данной работе, однако, эти методы не будут рассматриваться подробно, так как основная задача исследований, направленных на выявление долгопериодного сигнала в ДКД – это разрешение «проклятия длины сегмента», то есть поиск методов и подходов, способных выявлять климатическую изменчивость на периодах, превышающих время жизни отдельных деревьев.

### 1.3.2 Стандартизация региональной кривой роста (RCS)

Возможность и корректность использования дендрохронологических данных для восстановления долгопериодной климатической активно обсуждается в палеоклиматическом сообществе (Broecker 2001; Esper et al. 2002, 2003b; Bunn et al. 2004; Jones et al. 2009; Matskovsky and Helama 2014; Klippel et al. 2020). Статья К. Бриффы с соавторами (Briffa et al. 1992), а также исследование Я. Эспера (Esper et al. 2002) в некотором смысле начали новую эру в дендроклиматологии, возродив стандартизацию региональной кривой роста (RCS) и показав ее возможности для реконструкции низкочастотного климатического сигнала. Этот метод с различными модификациями является одним из современных стандартов стандартизации древесно-кольцевых данных. Обзор, посвященный различным модификациям метода RCS, был недавно опубликован С. Хеламой с соавторами (Helama et al. 2017).

Метод RCS основан на предположении о том, что деревья одного вида в некотором географическом регионе имеют схожую тенденцию изменения параметров годовых колец с возрастом (возрастную кривую роста), причем эта характеристика одинакова как для ныне живущих деревьев, так и для деревьев, росших на той же территории в прошлом (Helama et al. 2017). Для определения этой возрастной кривой все индивидуальные ряды измерений годовых колец выравниваются по камбиальному возрасту, то есть каждое годовое кольцо на оси абсцисс расположено согласно возрасту дерева на момент формирования этого кольца. После этого вычисляется средняя величина прироста для каждого камбиального возраста, выражающая процесс изменения прироста с возрастом для данного местообитания. Полученная возрастная кривая роста аппроксимируется некоторой сглаживающей функцией, например, отрицательной экспонентой (Briffa et al. 1992; Esper et al. 2003a) или кубическим сплайном (Cook and Peters 1981; Melvin et al. 2007). Полученное



аналитическое приближение используется затем для стандартизации всех рядов измерений – производится деление значений прироста на значение аппроксимирующей функции для соответствующего камбиального возраста. Вместо деления также может использоваться вычитание, при этом рекомендована процедура корректировки дисперсии полученных рядов (Cook and Peters 1997).

В работе К. Бриффы и Т. Мелвина (Briffa and Melvin 2011, с. 117) приводится подробная историческая справка о развитии концепции стандартизации региональной кривой роста, начиная с работ Хантингтона (Huntington 1914), Эрландсона (Erlandsson 1936), Митчелла (Mitchell 1967), Бекера (Becker 1989), Дюпуэй с соавторами (Dupouey et al. 1992) и Бриффы с соавторами (Briffa et al. 1992), где, собственно, и был введен термин «Regional Curve Standardization». Здесь необходимо добавить ссылки на работы отечественных авторов: аналогичные методики разрабатывали Т.Т. Битвинскас в 1961 г. (Битвинскас 1974, с. 57) и Г.Е. Комин (1970), М.М. Наурзбаев с соавторами (Naurzbaev et al. 2002, 2004).

В той же работе К. Бриффа и Т. Мелвин приводят основные работы, развивавшие концепцию RCS (Nicolussi et al. 1995; Badeau et al. 1996; Esper et al. 2002, 2003a; Helama et al. 2005b) а также работы, в которых данная методика применялась для реконструкции низкочастотной климатической изменчивости (Rathgeber et al. 1999; Cook et al. 2000; Grudd et al. 2002; Esper et al. 2003a; Helama et al. 2004a; Naurzbaev et al. 2004; Büntgen et al. 2005; Luckman and Wilson 2005; D'Arrigo et al. 2006; Linderholm et al. 2010). В частности, было показано, что метод RCS достаточно чувствителен как к общему количеству индивидуальных рядов измерений в наборе данных, так и к количеству годичных колец, покрывающих каждый год хронологии. Я. Эспер с соавторами (Esper et al. 2003a) на примере хронологии с о. Готланд показал, что требуется не менее 40 индивидуальных серий измерений для применения метода RCS и не менее 5 серий, покрывающих каждый период времени.

Метод RCS является теоретически обоснованным и широко применяется для дендроклиматических реконструкций, отражающих долгопериодную климатическую изменчивость, однако некорректное его применение может приводить к смещениям в получаемых ДКХ, что, в свою очередь, приведет к неверным заключениям об изменениях климата в прошлом. Эти смещения были описаны в уже упомянутой работе К. Бриффы и

Т. Мелвина (Briffa and Melvin 2011), краткое изложение основных тезисов которой приводится в следующем разделе.

### **1.3.3 Возможные смещения RCS хронологий**

Предположение о том, что климатический сигнал не влияет на итоговую возрастную кривую, используемую в методе RCS, не всегда выполняется в реальных условиях. Типы отклонений полученной хронологии, возникающие из-за частных случаев нарушения этого предположения, приведены далее.

#### ***Тренд в сигнале***

Первое отклонение, описанное под термином «тренд в сигнале» (“Trend-in-Signal” bias), возникает в RCS хронологиях, когда климатический сигнал имеет долгопериодную изменчивость с полупериодами близкими к длине хронологии или превышающими ее. Если в сигнале присутствует постоянный тренд, то (в простейшем случае) он присутствует и в каждом из индивидуальных рядов измерений, либо в их среднем значении. При выравнивании рядов измерений по камбиальному возрасту, этот климатический тренд смешивается с общим возрастным трендом. Таким образом, итоговая региональная кривая роста, полученная осреднением упорядоченных по камбиальному возрасту серий измерений, будет содержать в себе не только возрастную, но и климатический сигналы, которые в итоге будут убраны из серий измерений в процессе стандартизации. Полученная RCS хронология будет содержать отклонения, которые особенно сильно будут проявляться на ее концах, где отклонения отдельных серий измерений не осредняются при наложении. Бриффа и Мелвин отмечают (Briffa and Melvin 2011, с. 120), что это смещение может быть уменьшено или даже устранено при применении «очищающей от сигнала» (Signal-Free, SF) модификации RCS метода (RC1SF, см. раздел 2.2.1.1).

#### ***Различие в скорости роста одновременно живущих деревьев***

Второе возможное отклонение было описано под термином «различие в скоростях роста одновременно живущих деревьев» («Differing-Contemporaneous-Growth-Rate» bias). Оно возникает из-за того, что даже на одной пробной площади, где деревья произрастают в одинаковых климатических и экологических условиях, небольшие вариации в наклоне поверхности, влажности почвы или сомкнутости древостоя могут привести к различным

скоростям прироста. Если же метод RCS используется для большого числа деревьев с разных пробных площадей, то такие различия неизбежны. В этом случае наклон общей региональной кривой роста будет слишком крутым для относительно медленно растущих деревьев и слишком пологим для быстро растущих. Это несовпадение больше всего проявляется в ранние годы жизни деревьев. В итоговой хронологии отклонения будут проявляться в появлении искусственного среднечастотного сигнала в тех частях хронологии, где число быстро- и медленно растущих деревьев не сбалансировано. Особенно явно такие отклонения также будут проявляться на концах RCS хронологии. В частности, для правого конца RCS хронологии (современный период, охватывающий несколько последних десятилетий) такие отклонения могут приводить к отрицательному смещению из-за преобладания быстро растущих деревьев над медленно растущими. Это смещение может восприниматься как эффект дивергенции (см. раздел 1.5).

#### *Современная выборка*

Третье возможное отклонение описывается под термином «современная выборка» («Modern-Sample» bias). Оно проявляется как следствие предыдущего отклонения (т.е. из-за разных скоростей прироста у одновременно растущих деревьев), а также из-за различия в продолжительности жизни деревьев, связанной с наиболее часто используемой на практике методикой отбора образцов для дендроклиматических исследований.

При отборе образцов из живых деревьев примерно одного диаметра, долгоживущие деревья обладают меньшим средним приростом. При этом быстро растущие деревья, начавшие свой рост с этими медленно растущими, скорее всего, не дожили до момента отбора из-за превышения максимального диаметра, а медленно растущие живые деревья обычно не отбираются из-за малого диаметра. Из-за этого общая региональная кривая роста будет иметь искусственный отрицательный наклон, а хронология, построенная из живых деревьев методом RCS – искусственный положительный наклон. К. Бриффа и Т. Мелвин показали (Briffa and Melvin 2011, с. 126-127), что этот эффект будет иметь место не только для хронологий живых деревьев, но и проявляться в ранней и в современной части (последние 100 лет) RCS хронологии, построенной с использованием погребенной древесины. Также К. Бриффа и Т. Мелвин утверждают (там же, с. 129), что даже при использовании модификации RC1SF для выборки, состоящей только из живых деревьев,

общий наклон хронологии будет случайным, не обязательно содержащим корректный долгопериодный климатический сигнал.

Указанные три типа возможных смещений демонстрируют, что применение простой концепции RCS на практике может быть связано с определенными проблемами. Все описанные смещения особенно сильно могут проявляться на обоих концах древесно-кольцевой хронологии. Они должны учитываться при оценке неопределенностей палеоклиматических реконструкций, полученных с использованием метода RCS.

### **1.3.4 Современные тенденции развития методов стандартизации**

Современным стандартом использования среди детерминистских методов стандартизации является SF метод (подробное описание в разделе 2.1.1.0). RCS с различными модификациями является предпочтительным при работе с ДКХ, основанными на объединении материала из живых и погребенных деревьев, как попытка преодолеть «проклятие длины сегмента». Развитие этой области дендроклиматологии продолжается, и в данном разделе описаны основные идеи и особенности методов, представляющих новую парадигму в развитии методов стандартизации и активно развивающихся в последнее десятилетие. К этим методам относятся иерархические байесовские модели (Tolwinski-Ward et al. 2015; Schofield et al. 2016; Guin et al. 2018), метод прямой реконструкции (Matskovsky and Helama 2016b) и усвоение дендрохронологических данных через имитационные модели роста (Fang and Li 2019). Важно также упомянуть перспективные идеи, предложенные ранее. Оригинальный подход к стандартизации серий ширины годовых колец предложил В. С. Мазепа (Мазепа 1982). Метод основан на анализе гистограмм индексов прироста в каждом году и учете принципа лимитирующих факторов. К сожалению, метод не был реализован в виде общедоступной программы и не был апробирован на большом количестве данных. Также отсутствуют публикации о его возможностях по воспроизведению долгопериодной климатической изменчивости.

На основе теоремы Байеса можно учитывать некоторое априорное знание об изучаемом феномене и обновлять это знание на основе новой полученной информации. И априорное знание, и новая информация в этом случае представляются в виде распределения вероятности. Например, мы знаем, что после сильного вулканического извержения может произойти похолодание, и предполагаем, что у распределения температур будет

пониженное на один градус математическое ожидание по сравнению с современной климатологией. После этого мы можем взять распределение измеренных значений ширины годовых колец для этого года и применив теорему Байеса получить апостериорное распределение температур с учетом полученной информации о годовых кольцах. На основе полученного апостериорного распределения можно не только оценить математическое ожидание (среднее значение), но и другую статистику, например стандартное отклонение или погрешности в виде 5й и 95й перцентилей этого распределения. Иерархические байесовские модели также действуют на основе теоремы Байеса, но имеют несколько уровней, на которых можно вносить дополнительную информацию о процессах. Например, можно добавить информацию о том, что прирост зависит от возраста дерева, а также ввести некоторую более сложную и реалистичную модель, где прирост зависит не только от температуры, но и от влажности почвы. При этом преимущества использования теоремы Байеса остаются – мы можем учитывать априорное знание о явлении, вносить оценки погрешностей для этого знания и для новой информации, используемой для его обновления, а также получать итоговое распределение с учетом всех погрешностей и с возможностью оценить погрешности результата.

Иерархические байесовские модели позволяют выйти на новый уровень обработки древесно-кольцевых данных. Так, в работе (Schofield et al. 2016) представлен общий подход к дендроклиматическим реконструкциям на основе иерархических байесовских моделей, позволяющий математически описать и объединить основные используемые на данный момент методики стандартизации и калибровки, в том числе детерминистскую стандартизацию и метод RCS. Плюсами предложенного подхода являются объединение разных этапов процесса реконструкции в одном фреймворке, четкое математическое описание всех этих этапов и возможность получения неопределенностей реконструкции, которые будут учитывать все неопределенности использованных данных и моделей.

В работе (Tolwinski-Ward et al. 2015) иерархические байесовские модели были использованы для одновременной вероятностной реконструкции температуры и влажности почвы на основе ширины годовых колец с учетом возможного изменения лимитирующего фактора во времени. При этом зависимость прироста от климатических параметров была описана на основе упрощенной имитационной модели VS-Lite.

Также иерархические байесовские модели были использованы для извлечения общего сигнала из набора ДКД (Boreux et al. 2009; Guin et al. 2018), что также может быть использовано для получения информации о климате прошлого на разных частотах. Однако слабой стороной подхода, описанного в указанных работах, по моему мнению, являются слишком жесткие предположения о частотных характеристиках возрастного сигнала в ДКД, способные нарушить частотную структуру реконструируемого климатического сигнала.

Метод прямой реконструкции DIRECT, предложенный в работе (Matskovsky and Helama 2016b) позволяет миновать процесс стандартизации с помощью специальной функции отклика, использующей информацию о возрасте деревьев. Этот метод подробно описан в главе 3.

В дальнейшем эволюция методов стандартизации видится мне следующим образом. Для получения палеоклиматических реконструкций древесно-кольцевые данные будут ассимилироваться в результаты палеоклиматического моделирования с использованием имитационных моделей (Fang and Li 2019), позволяющих учитывать особенности их формирования в зависимости от возраста и механизмов различных физиологических процессов, протекающих в деревьях, а также особенности местообитания. Но поскольку даже линейные зависимости ДКХ от климатических параметров часто представляются достаточно надежными для получения новой информации о климате прошлого, классические методы стандартизации еще долго будут занимать важное место в дендроклиматологии.

#### **1.4 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. Существуют единичные ряды метеорологических наблюдений, длина которых

превышает 200 лет (Peterson and Vose 1997), но все они находятся в Европе, поэтому их ценность для изучения климата всей планеты ограничена, в том числе, из-за неоднородности климатической изменчивости в разных районах земного шара. Количество, качество и пространственное покрытие метеорологических рядов также быстро убывает во времени. Кроме того, даже в относительно благополучных в этом смысле регионах, таких как южная Европа, при калибровке прокси-данных часто ведется дискуссия об относительной надежности ранней части инструментального периода (например, Büntgen et al. 2017). При этом исследователи неоднократно обращали внимание на важность периода калибровки, в том числе для реконструкции долгопериодной изменчивости. Так, Я. Эспер с соавторами показали (Esper et al. 2005), что только использование разных подходов при калибровке (в том числе изменение периода калибровки и использование сглаживания) может привести к различиям в амплитудах реконструированных температур северного полушария до  $0,5^{\circ}$ , что соответствует оценкам тысячелетней амплитуды изменений среднегодовых температур, имевшимся на тот момент. В работе Л. Клиппель и соавторов (Klippel et al. 2020, рис. 4 из их статьи) было показано, что только нормализация древесно-кольцевых данных за разные подпериоды максимально возможного инструментального периода (1758-1972 гг.) приводит к изменению значений доиндустриального тысячелетнего тренда вплоть до противоположных. Процедура нормализации данных эквивалентна скейлингу, часто используемому для калибровки прокси-данных, поэтому эти результаты напрямую относятся к обсуждаемой теме.

Если период калибровки и наличие качественных данных так актуальны для древесно-кольцевых данных, обладающих годичным разрешением, все то же должно быть еще более важно для данных низкого разрешения. Ведь с падением разрешения значительно уменьшается количество точек калибровки на инструментальном периоде. Сложности калибровки долгопериодной составляющей реконструкции отмечены в обзорной работе Ф. Джонса и соавторов (Jones et al. 2009). Хотя некоторые исследователи указывают на ограниченную способность древесно-кольцевых данных представлять долгопериодную климатическую изменчивость по сравнению с другими прокси, а в более старых работах вообще ставилось под сомнение такое их свойство (Broecker 2001), 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. Поэтому хочется отметить важность использования прокси-данных высокого разрешения и надежной хронологии, коими являются преимущественно древесно-кольцевые данные, для палеоклиматических реконструкций, в том числе для оценки долгопериодных климатических изменений в прошлом.

### **1.5 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). Назывались различные возможные локальные и глобальные причины этого ослабления, такие как увеличивающееся воздействие засухи при ускоренном потеплении, достижение климатическими параметрами важных для растений физиологических порогов, «затемнение» атмосферы из-за антропогенных аэрозолей, локальное загрязнение воздуха и почвы, и другие (D'Arrigo et al. 2008; Kirilyanov et al. 2020; Büntgen et al. 2021a), однако существования какой-то общей причины доказано не было. Более того, Я. Эспер и Д. Франк опубликовали исследование, в котором показали, что во многих случаях, когда сообщалось о феномене дивергенции, наблюдаемое отклонение может быть искусственно вызвано неправильным сбором, обработкой и калибровкой древесно-кольцевых данных (Esper and Frank 2009). Тем не менее, проблема дивергенции до сих пор вызывает серьезную озабоченность в палеоклиматологическом сообществе.

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. Так как изменение периода калибровки может приводить к значительным изменениям оценок реконструируемого климатического параметра (что было описано в предыдущем разделе), это вносит дополнительную неопределенность, а также вызывает определенные сомнения в возможности продления калибровочного периода при удлинении инструментальных рядов наблюдений в будущем.

В-третьих, наличие дивергенции может говорить о физиологических ограничениях на амплитуду реконструируемых климатических параметров. Если значения изучаемого климатического параметра находятся или когда-то находились за пределами его линейного влияния на параметры годовых колец, это ограничивает максимальную амплитуду реконструкции, что может привести к потере информации о долгопериодной климатической изменчивости в прошлом (рис. 1.1).

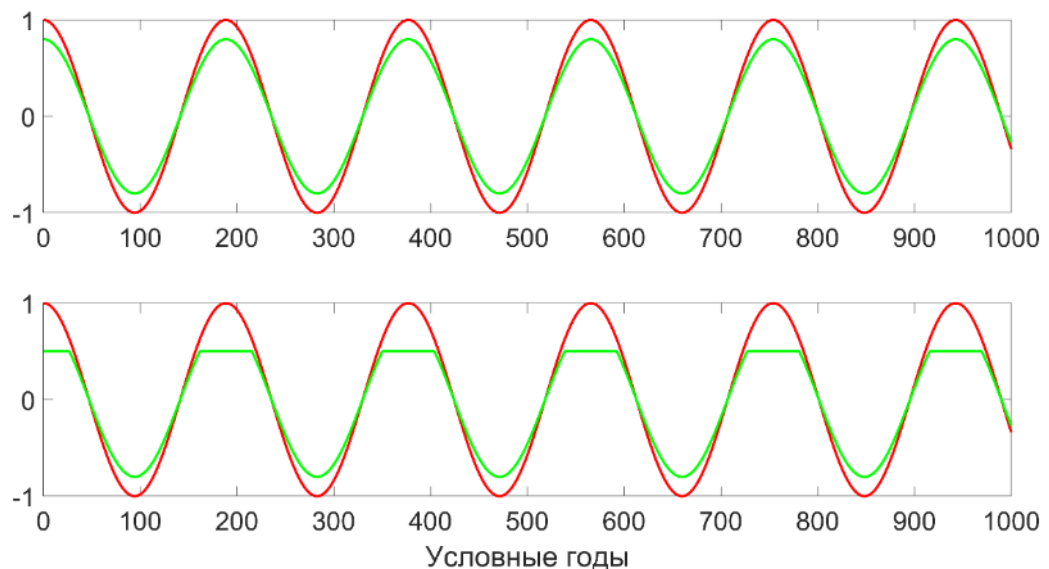


Рисунок 1.1 – Теоретическое представление влияния эффекта дивергенции на реконструкцию климатического параметра. Красным цветом показано изменение климатического параметра, зеленым – его реконструкция на основе ДКД. Сверху эффект

дивергенции отсутствует. Снизу дивергенция возникает из-за достижения предельных значений климатического параметра (температура, влажность почвы), после которого его увеличение уже не влияет на увеличение прироста.

В-четвертых, причиной дивергенции может быть изменение климатического отклика на фоне значительных изменений окружающей среды или локальных условий произрастания. Такими изменениями могут являться изменение концентрации углекислого газа в атмосфере (что влияет на процесс фотосинтеза), деградация мерзлоты, изменение состава растительного сообщества. Все эти изменения должны рассматриваться в совокупности при проведении дендроклиматического исследования (Vaganov et al. 2006), но безусловно могут сильно осложнить и, в некоторых случаях, сделать невозможной палеоклиматическую интерпретацию ДКД.

Несмотря на все приведенные замечания, само по себе наличие дивергенции в исследуемых ДКХ еще не означает неспособность древесно-кольцевых данных сохранять долгопериодную климатическую изменчивость. Как будет показано в главе 3, она может содержаться в таких параметрах исследуемой выборки, как соотношение быстро и медленно растущих деревьев (рис. 1.2). Таким образом, в некоторых случаях можно предполагать наличие дивергенции у некоторой группы деревьев, но не в популяции в целом, что является позитивным сигналом для палеоклиматического сообщества.

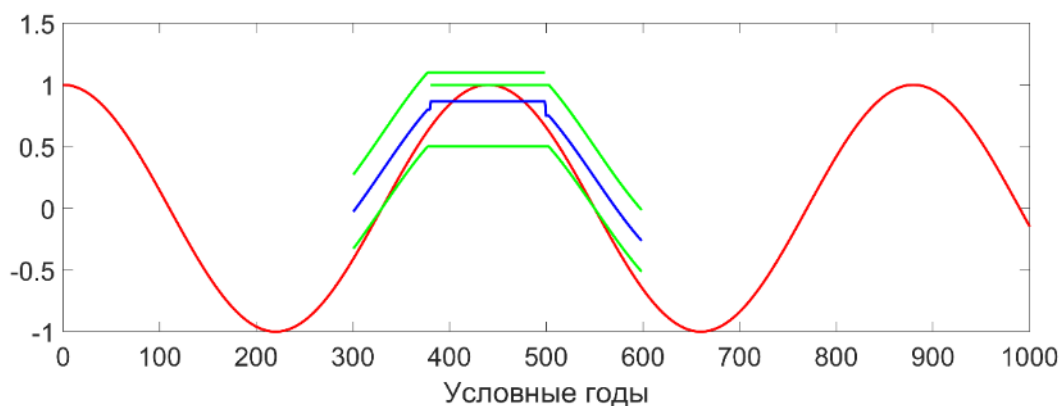


Рисунок 1.2 – Теоретическое представление отсутствия влияния эффекта дивергенции на реконструкцию климатического параметра. Красным цветом показано изменение климатического параметра, зеленым – индивидуальные серии измерений параметров

годовых колец, в которых наблюдается эффект дивергенции. Синим показано среднее значение индивидуальных серий измерений, использованное для теоретической реконструкции климатического параметра. В итоге эффект дивергенции отсутствует за счет структуры выборки образцов.

Другим позитивным сигналом стала публикация Й. Бьорклунда с соавторами (Björklund et al. 2019b), где они обсуждают возможную причину дивергенции в одном из самых чувствительных параметров годовых колец – максимальной плотности древесины. Авторы показали, что дивергенция может быть связана не с естественными причинами, а с техническими ограничениями метода, а именно с разрешающей способностью сенсора, измеряющего плотность. При увеличении разрешения метода, например, с помощью измерения плотности древесины на основе количественных показателей ее анатомической структуры или с помощью увеличения разрешающей способности сенсора, эффект дивергенции может пропасть.

## **1.6 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 (рис. 1.3, 1.4). Очевидно, что ответить на данный вопрос невозможно опираясь только на прокси-данные низкого разрешения. Также очевидно, что анализируя длинные ряды с изменяющимся разрешением (часто это падение разрешения при углублении в прошлое), можно получить ошибочное представление как о соотношении долгопериодной и высокочастотной изменчивости, так и о соотношении уровней значений климатических параметров в разные периоды. 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).

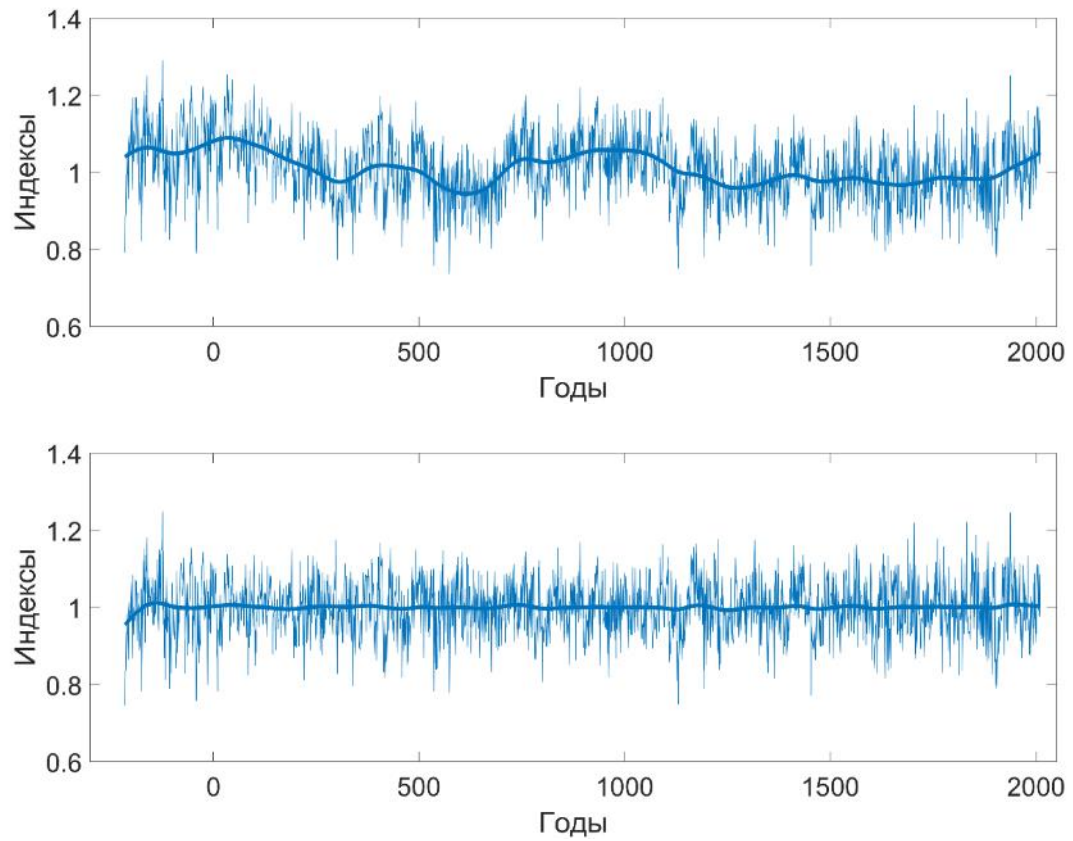


Рисунок 1.3 – Хронологии по максимальной плотности годовых колец из северной Фенноскандии, построенные разными методами стандартизации – RCS (сверху) и SF (снизу).

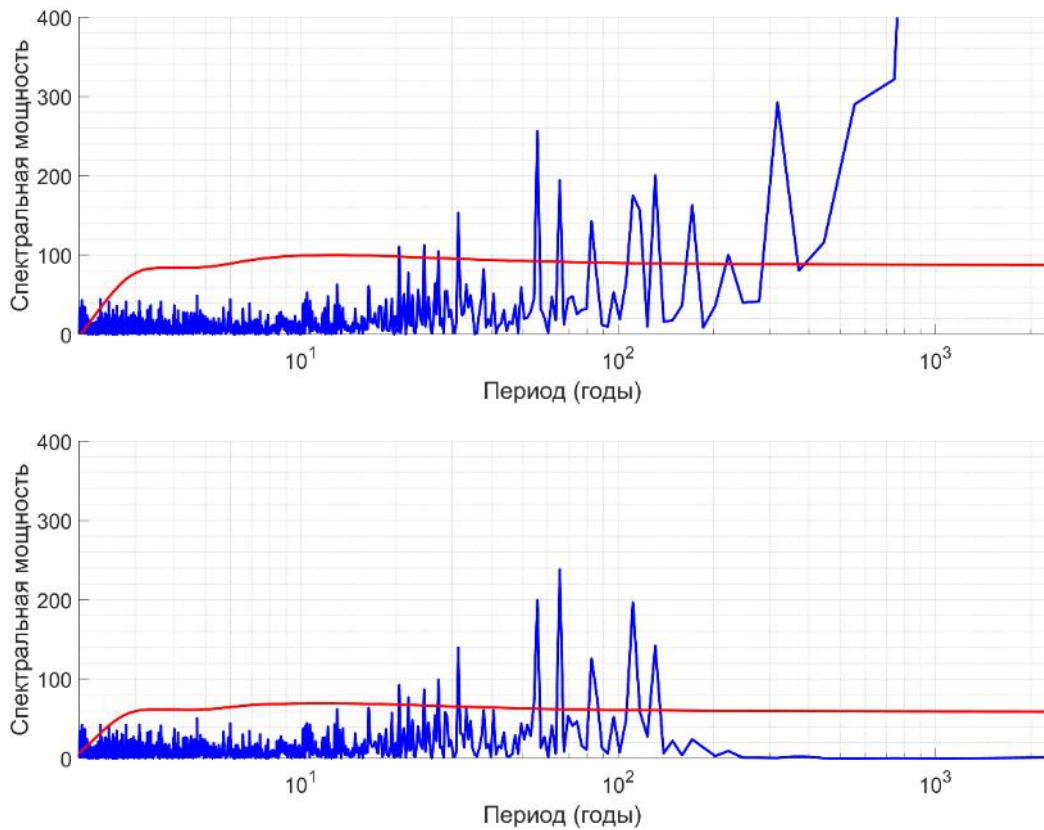


Рисунок 1.4 – спектры преобразования Фурье для хронологий с рисунка 1.3. Видна схожесть спектров на средних частотах от 20 до 130 лет, и разница на более длительных периодах. Для хронологии, построенной при помощи детерминистской стандартизации методом SF (снизу), в спектре отсутствует долгопериодная изменчивость.

Интересно, что 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, построенные с использованием живых деревьев, а также архитектурной и археологической древесины, 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). Сравнение этих рядов приведено на рис. 1.5. Для архангельской ДКХ помимо хорошо заметной 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. То, что сглаживание временных рядов может приводить к повышению коэффициента корреляции за счет сокращения степеней свободы - общеизвестный факт, но это не умаляет полезности сглаженных рядов для получения информации о долгопериодной изменчивости климата в прошлом. При этом потенциал реконструкции межгодовой изменчивости может быть ограничен, что и наблюдается для двух рассмотренных хронологий ширины годовых колец.

Для получения интуитивного представления о соотношении долгопериодной и высокочастотной составляющей в рядах палеоклиматических данных был проведен следующий эксперимент. К инструментальному ряду летних температур (июнь-август) в Турнедалене (северная Фенноскандия), покрывающего период 1802-2011 гг., был добавлен белый шум со стандартными отклонениями 1 и 2 (рис. 1.6). Стандартное отклонение исходного ряда – 1,16, первого модифицированного ряда – 1,5, второго – 2,2. Корреляция исходного ряда с первым и вторым модифицированными рядами – 0,77 и 0,50, соответственно. Эти значения близки к значениям корреляции древесно-кольцевых хронологий по максимальной плотности и по ширине годовых колец, соответственно, с летними температурами в данном регионе. Таким образом, можно считать, что модифицированные ряды представляют древесно-кольцевые «прокси» для исходного ряда. При существенном увеличении разброса модифицированных рядов по сравнению с исходным, сглаженные ряды (на основе 50-летнего сплайна) показывают сходную изменчивость и тренды. Линейный тренд исходного ряда составляет  $0,55$  °C на сто лет, у первого модифицированного ряда –  $0,68$  °C на сто лет, у второго –  $0,41$  °C на сто лет. При этом два первых тренда статистически значимы на уровне ( $p < 0,05$ ), а третий не значим ( $p = 0,1$ ). Отсутствие значимости тренда второго модифицированного ряда связано с большей дисперсией ряда.

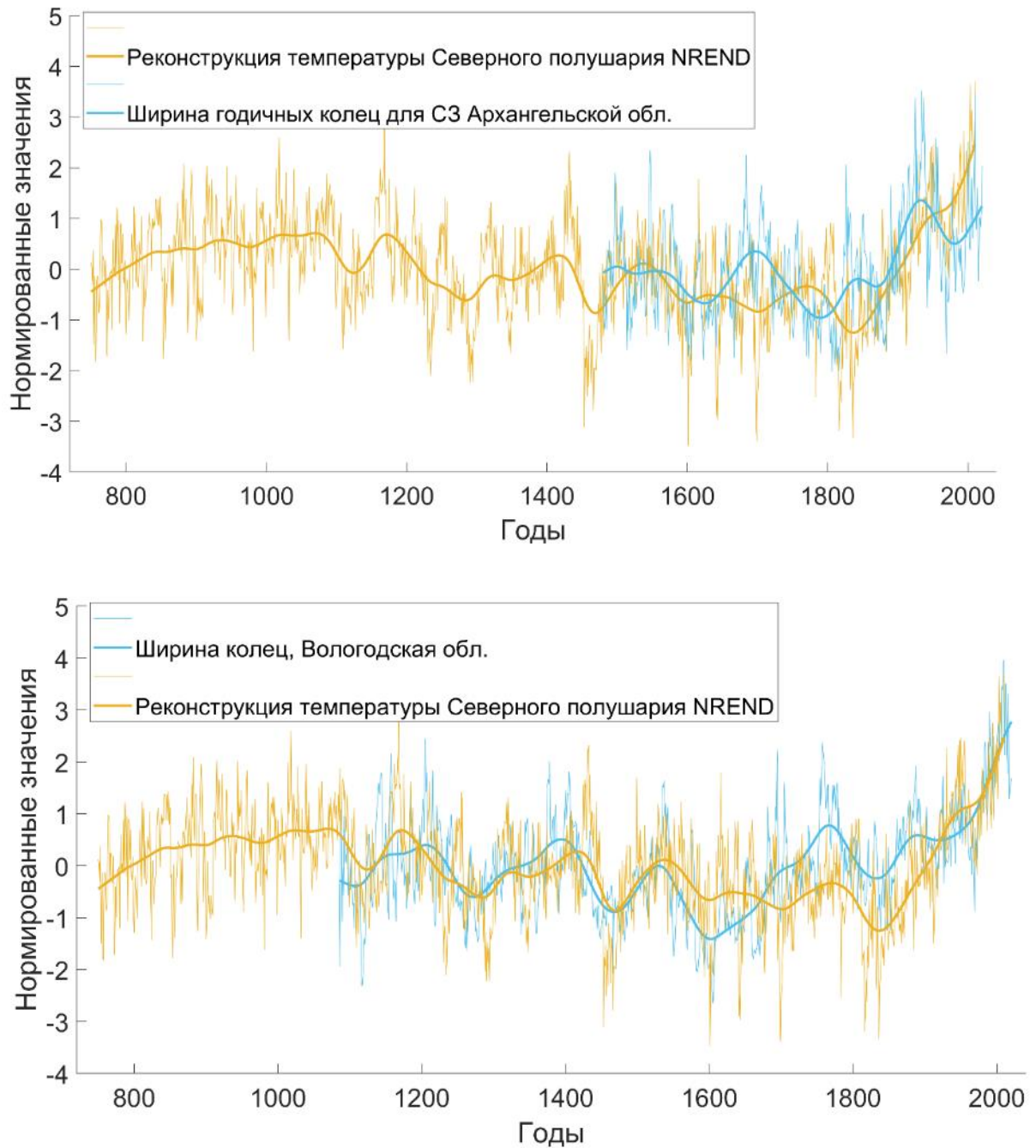


Рисунок 1.5 – Хронология ширины колец хвойных для северо-запада Архангельской области (синий) и реконструкция летней температуры Северного полушария (Wilson et al. 2016) (желтый). Исходные серии (тонкие линии) сглажены 100-летним сплайном (жирные линии).

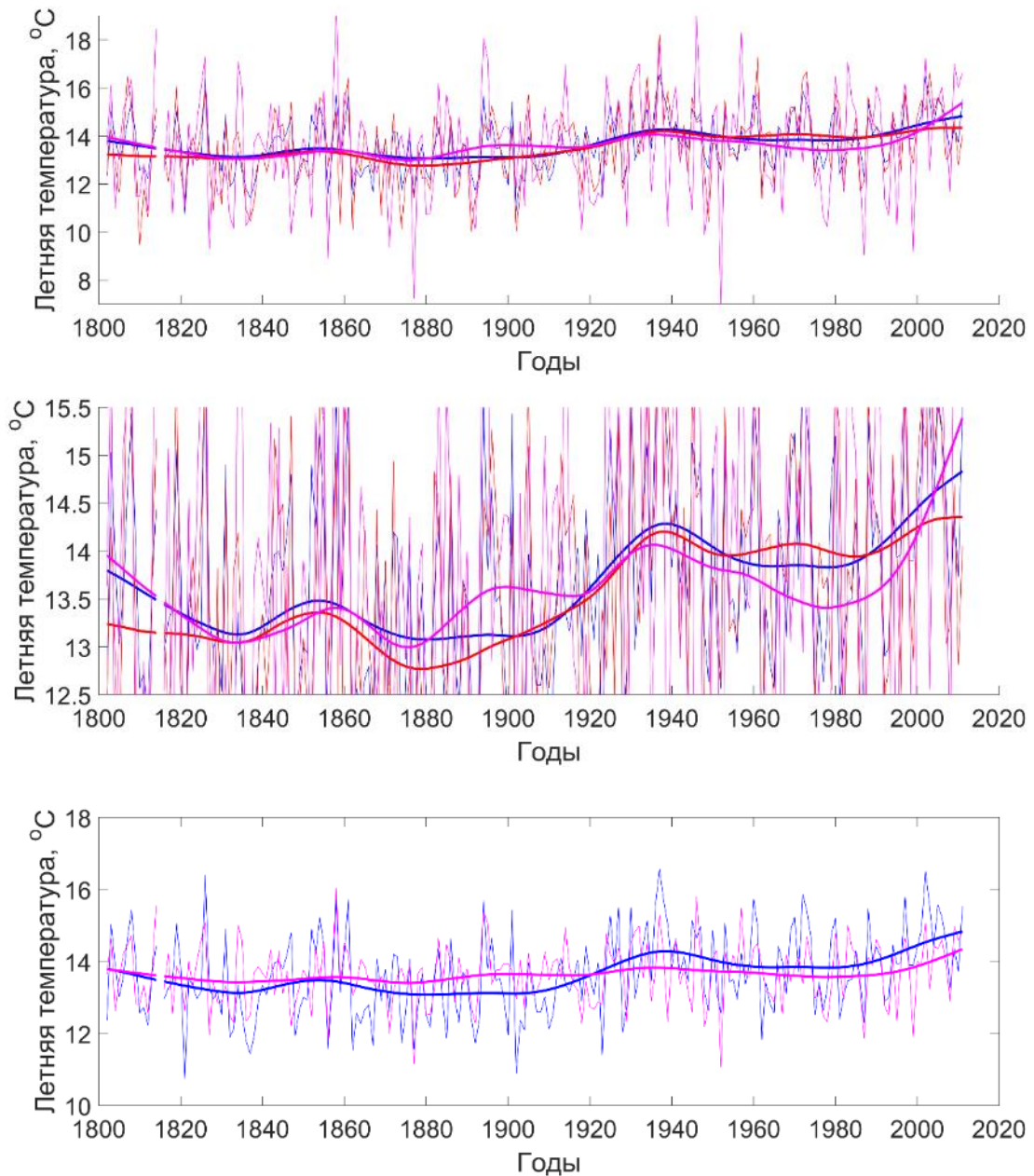


Рисунок 1.6 – теоретический пример зашумления температурного сигнала. Синим цветом показаны инструментальные измерения летней температуры в Турнедалене, красным и малиновым – те же значения с добавлением белого шума с нормальным распределением и стандартным отклонением 1 и 2. Жирными линиями показано сглаживание 50-летним сплайном. Сверху и в центре приведены одни и те же ряды, но в разном масштабе по оси ординат. Снизу второй модифицированный ряд нормирован к исходному ряду, что соответствует процедуре скейлинга.



Второй модифицированный ряд затем был нормирован, чтобы соответствовать среднему значению и стандартному отклонению исходного ряда. Это соответствует процедуре скейлинга, часто используемой для калибровки прокси-данных по инструментальным рядам наблюдений. После скейлинга дисперсия исходного и модифицированного рядов совпадает, но долгопериодная изменчивость модифицированного ряда теперь уменьшилась. Приведенные теоретические данные не только дают представление о соотношении долгопериодной и высокочастотной составляющей в рядах палеоклиматических данных, но и позволяют предположить, что для некоторых из них, не обладающих достаточной силой связи с целевым климатическим параметром на уровне межгодовой изменчивости, калибровку стоит производить по сглаженным значениям (Lee et al. 2008). Это позволит лучше оценить долгопериодные климатические изменения в прошлом. Но к интерпретации реконструированной межгодовой изменчивости, особенно ее разброса, в этом случае стоит относиться с осторожностью.

## **1.7 Выводы к главе 1**

На основе проведенного обзора литературы можно обозначить следующие особенности использования древесно-кольцевых данных для реконструкции долгопериодной климатической изменчивости:

1) Древесно-кольцевые данные являются уникальным источником информации о климате прошлого, прежде всего благодаря своему высокому разрешению, точной хронологической привязке, повторности и широкому географическому распространению. Эти свойства ДКД позволяют получать информацию о климате прошлого недоступную из других палеоклиматических архивов.

2) Долговременные изменения параметров годичных колец, связанные с возрастом дерева, являются одним из основных ограничений для надежной реконструкции долгопериодной климатической изменчивости на основе ДКД. Для удаления возрастных трендов используются так называемые методы стандартизации. Вопрос о наилучшем методе стандартизации рано считать закрытым. Методы SF и RCS являются современным стандартом в этой области, но попытки усовершенствования методологии, в основном

направленные на улучшение отображения долгопериодной климатической изменчивости в ДКХ, не прекращаются.

3) Калибровка относительно инструментальных рядов наблюдений является важнейшим этапом любой количественной палеоклиматической реконструкции. Высокое разрешение ДКД позволяет получать надежные зависимости благодаря большому количеству точек, используемых для калибровки. Долгопериодная изменчивость в ДКД, тем не менее, не может быть откалибрована с той же степенью надежности, что и высокочастотная, из-за снижения степеней свободы при сглаживании исходных рядов. Дополнительную неопределенность может вносить разное соотношение сигнал/шум в ДКХ и связанное с ним соотношение высокочастотной и долгопериодной изменчивости.

4) Соотношение высокочастотной и долгопериодной изменчивости в прокси-данных, в частности в ДКД, является важным показателем для понимания изменений климата в прошлом. Корректно оценить этот показатель можно только на основе данных высокого разрешения, что подчеркивает важность палеоклиматических исследований на основе ДКД.

5) Статистически-значимые тысячелетние тренды, присутствующие в дендроклиматических реконструкциях (в том числе полученных на основе параметров годовых колец с выраженным возрастным трендом) позволяют говорить о способности дендрохронологических данных сохранять информацию о долгопериодной климатической изменчивости. Но расхождение в амплитудах колебаний и трендах с прокси-данными низкого разрешения ставит вопрос о пределах этих возможностей.

6) Дивергенция, т.е. ослабление климатического отклика ДКХ на части инструментального периода, может являться серьезной проблемой для реконструкции климатических параметров на основе ДКД, в том числе их долгопериодной изменчивости. Тщательный анализ ДКД в каждом случае необходим для понимания причин дивергенции – связана ли она с техническими этапами построения ДКХ или с физиологическими ограничениями деревьев, приводящих к нарушению принципа униформизма.

7) Развитие методов получения древесно-кольцевых данных, таких как изотопная масс-спектрометрия и количественные оценки анатомических характеристик строения

древесины, вселяют надежду на получение новых массивов древесно-кольцевых данных, лучше сохраняющих информацию о долгопериодной климатической изменчивости.

Другие факторы, которые могут влиять на долгопериодную изменчивость, содержащуюся в древесно-кольцевых данных, это 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). Несмотря на все описанные трудности, которые могут возникать при реконструкции долгопериодной климатической изменчивости на основе древесно-кольцевых данных, хочется отметить, что их уникальные преимущества, в том числе высокое разрешение, точность хронологической привязки, повторность и широкое географическое распространение, являются решающим фактором при их использовании для этих целей.

Поскольку 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, 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)

Методика исследования менялась с учетом специфики целей, поставленных в каждой главе. Основа дендрохронологического метода – перекрестное датирование образцов – выполнялось во всех случаях, тогда как отдельные детали процесса получения, обработки и анализа данных отличались. Поэтому описание методики, несмотря на некоторые неизбежные повторы, приведено в каждой главе – для обеспечения воспроизводимости результатов и удобства чтения.

## **Глава 2. Методы стандартизации, сохраняющие долгосрочную 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 долгосрочной климатической изменчивости из древесно-кольцевых данных. В этой главе проводятся различные эксперименты для определения возможных смещений в реконструированном долгосрочном 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.

### **2.1 Методика экспериментов**

#### **2.1.1 Используемые методы стандартизации**

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). Все алгоритмы были реализованы в среде Matlab. Для сглаживания региональной кривой роста в методе RCS и его модификациях использовался кубический сплайн с изменяемой жесткостью (Melvin et al. 2007), позволяющий имплементировать разную жесткость сглаживающей кривой на начальном этапе роста дерева (более гибкий сплайн) и на конечном этапе (большая жесткость).

Хочется отметить, что метод RCM ранее описан не был – в настоящей работе он впервые описан, реализован и протестирован в сравнении с другими методами. Три перечисленных метода стандартизации (ECS, CM и RCM) были теоретически разработаны

для ширины годовых колец, и поэтому применительно к максимальной плотности (MXD) используются здесь с дополнительными предположениями. Кроме того, метод ECS изначально был разработан для хронологий длиной в несколько тысячелетий, но в данной работе тестируется на хронологиях длиной 1,5-2 тысячи лет.

#### ***2.1.1.0 Стандартизация на основе «очистения от сигнала»***

Идея метода стандартизации, называемого в англоязычной литературе как «метод очищающий от сигнала» (далее SF, Signal-Free approach) (Melvin 2004; Melvin and Briffa 2008), состоит в итерационном удалении («очистении») общего климатического сигнала из анализируемых серий измерений годовых колец и в дальнейшей оценке возрастных трендов на основе «очищенных» от климатического сигнала серий. Предполагается, что удаленные возрастные тренды не будут содержать климатический сигнал и, таким образом, он будет сохранен в итоговой древесно-кольцевой хронологии. Итерационное удаление климатического сигнала, тем не менее, основано на предположении, что весь общий сигнал в сериях измерений годовых колец является климатическим. Как было показано в работе (Briffa and Melvin 2011), это предположение не всегда выполняется (см. раздел 1.3.3). Тем не менее, данный метод показал хорошие результаты на практике и является одним из стандартов в современной дендроклиматологии.

Сам по себе метод SF не обходит известное «проклятие длины сегмента» (см. раздел 1.3.1), но К. Анчукайтис с соавторами (Anchukaitis et al. 2013) показали, что при небольшой модификации базового алгоритма SF, а именно при отсутствии приведения среднего значения рядов к единице на каждой итерации SF-алгоритма, итоговая хронология может сохранять низкочастотную изменчивость. Они же на примере смоделированных древесно-кольцевых хронологий («псевдохронологий») показали, что такая хронология, полученная модифицированным SF-методом, может лучше отражать климатическую изменчивость, чем хронологии, полученные на основе метода RCS.

#### ***2.1.1.1 RCISF***

Метод стандартизации региональной кривой с SF (signal-free, очищение от сигнала) модификацией (Signal-Free RCS, далее RCISF, см. дополнение к статье (Briffa and Melvin 2011)) является комбинацией классического метода RCS (описан в разделе 1.3.2) и метода SF (описан в разделе 2.1.1.0). Данная модификация была предложена для уменьшения

возможных отклонений в RCS хронологиях, описанных в работе (Briffa and Melvin 2011), и перечисленных в разделе 1.3.3 данной работы. Цифра 1 в аббревиатуре метода указывает на использование одной региональной кривой роста.

Процедура построения RC1SF хронологии заключается в следующем. Исходные измерения ширины (или другого параметра) годовых колец, упорядоченные по календарным датам, делятся на соответствующие индексы RCS хронологии, воспринимающейся на каждой итерации метода как «действительный» климатический сигнал. Преобразованные измерения используются для построения следующей RCS хронологии, после чего процедура повторяется. После нескольких таких итераций (детали описаны в статье (Melvin and Briffa 2008)) получаются «очищенные от сигнала» (SF) измерения, т.е. индивидуальные индексные ряды для деревьев, из которых удален общий (климатический) сигнал. Дальнейший процесс построения хронологии технически соответствует обычному методу RCS, с использованием исходных измерений и региональной кривой роста, рассчитанной по «очищенным от климатического сигнала» индивидуальным рядам наблюдений. Таким образом предполагается, что региональная кривая роста, используемая для удаления возрастного тренда из исходных серий измерений, выражает только возрастной тренд популяции и не смещена под влиянием климатического фактора.

Результаты С. Хеламы и соавторов при сравнении обычного RCS и RC1SF (Helama et al. 2010) показали, что RC1SF хронологии превосходят обычные RCS хронологии по таким параметрам как средний межсерийный коэффициент корреляции, корреляции между хронологиями, полученными по двум различным косвенным источникам климатической информации (ширина колец сосны обыкновенной и годичный прирост раковины жемчужницы речной), корреляции хронологий со среднемесячными метеопараметрами. В результате авторы использовали именно RC1SF хронологии для обобщенной реконструкции температуры. Но эти результаты не могут считаться исчерпывающими по нескольким причинам. Во-первых, древесно-кольцевые данные, использованные в работе (Helama et al. 2010), получены только из живых деревьев. Такая структура набора данных может служить источником отклонений в RCS хронологиях (Melvin 2004; Briffa and Melvin 2011), поэтому, наряду с рядами из живых деревьев, рекомендуется использовать ряды измерений, полученных для деревьев с различными датами смерти (Briffa et al. 1996). Во-

вторых, в работе (Helama et al. 2010) используется только пять серий годовичного прироста раковин жемчужницы речной (подробнее в (Helama et al. 2009b)), как живых, так и полуископаемых образцов, что явно недостаточно для статистической устойчивости результатов. Как уже упоминалось, для применения метода RCS, желательно иметь не менее 40 индивидуальных рядов измерений, иначе результирующая хронология может испытывать значительные отклонения. Как было показано в работе (Мацковский 2011), для метода RC1SF большая репликация измерений еще более важна, чем при использовании метода RCS.

На примере реальных и модельных данных RC1SF сравнивались с классическим RCS в работе (Мацковский 2011), в которой эксперименты показали преимущество RC1SF над обычным RCS на всех четырех исследованных наборах данных в смысле лучшего соответствия заданного и реконструированного сигнала. В экспериментах по сокращению исходной выборки RC1SF метод показал худшие, либо сходные результаты на всех четырех исследованных наборах данных. Поэтому при использовании наборов данных, имеющих менее 40 рядов либо менее 5 рядов на каком-либо временном интервале, метод RC1SF нужно применять с осторожностью. В этом случае классический метод RCS может быть предпочтительнее.

#### ***2.1.1.2 RCS с несколькими региональными кривыми роста***

Ян Эспер с соавторами (Esper et al. 2002) впервые применили две различные региональные кривые роста для набора данных, включающего более 1000 индивидуальных рядов с 14 пробных площадей для Северного полушария. Они использовали линейную функцию и отрицательную экспоненту, чтобы описать возрастные изменения всех деревьев, которые, соответственно, были разделены на две группы. К. Бриффа и Т. Мелвин (Briffa and Melvin 2011, с. 132-134) показали, что использование даже двух региональных кривых роста для такого разнообразия регионов и видов деревьев может привести к значительным отклонениям в итоговой хронологии. В нашей работе мы обозначаем RCS хронологии, полученные с использованием одной региональной кривой роста как RC1, двух – как RC2, и т.д.

Тем не менее, Т. Мелвин в своей диссертации (Melvin 2004, раздел 5.7 его работы) описывает модификацию RCS с использованием нескольких региональных кривых роста,



построенных для групп деревьев, сформированных на основе средней скорости прироста, и показывает, что применение этой модификации к сериям измерений с одной пробной площади может уменьшить отклонение, связанное с различием в скоростях роста одновременно живущих деревьев. К сожалению, в этом случае удаляется часть низкочастотной изменчивости, связанной с различиями в средних значениях промежуточных RCS хронологий. Поэтому существует необходимость в практическом методе, позволяющем отделить настоящие низкочастотные климатические колебания от ложных трендов, возникающих из-за климатически необусловленных различий в скорости роста деревьев (Briffa and Melvin 2011, с. 141). Возможно, отчасти эту проблему решает комбинация RCS и SF, а также использование нескольких региональных кривых роста – т.е. RC2SF метод. Комбинация RC2 и SF методов (RC2SF) с успехом применялась в работах (Cooper et al. 2013; Melvin et al. 2013; Wilson et al. 2013) для построения палеоклиматических реконструкций.

#### *2.1.1.3 Стандартизация с учетом изменений окружающей среды*

С. Хеламма и соавторы (Helama et al. 2005a) предложили модификацию RCS, основанную на предположении, что параметр  $b$  изгиба возрастного тренда в формуле

$$y = a * e^{-bx} + c$$

связан с изменяющейся сомкнутостью древостоя, которую они оценивали для северной Финляндии по изменению числа образцов во времени (Helama et al. 2004b). Оставив без изменения параметры  $a$  и  $c$  в этой формуле, они оценивали параметр  $b$  как изменяющийся во времени, что позволило им получить реконструкцию низкочастотной климатической изменчивости, лучше коррелирующую с другими косвенными данными о климате прошлого (Helama et al. 2005a). К. Бриффа и Т. Мелвин (Briffa and Melvin 2011, с. 135-137) позже выступали с критикой некоторых предположений, лежащих в основе этой модификации, в частности того, что параметр вогнутости, влияющий на форму региональной кривой роста, не зависит от средней скорости прироста.

#### ***2.1.1.4 Другие модификации RCS***

Метод корректировки RCS был впервые описан в работе (Мацковский 2011), а после этого был реализован и протестирован на данных максимальной плотности годовых колец из северной части Скандинавского полуострова, показав лучшие результаты по сравнению с некорректированными RC1, RC1SF и RC2SF хронологиями (Matskovsky and Helama 2014) по нескольким оценивавшимся метрикам. Идея метода заключается в том, что отклонения от моделируемого климатического сигнала могут быть вычтены из хронологии, построенной по реальным данным, для корректировки тех смещений, которые вызваны исключительно структурой набора данных, а именно распределением образцов во времени и формой возрастных трендов. Предлагаемая процедура является следующей. На первом этапе моделируется набор данных на основе исходной дендрохронологической информации (см. раздел 2.1.3), где в качестве климатического сигнала используется константа. Затем строится RC1SF хронология на основе модельных данных, из которой вычитается заложенный в нее климатический сигнал, т. е. константа. Разность является оценкой отклонения, вызванного структурой данных. Последним этапом является вычитание этих значений из RC1SF хронологии, построенной по реальным данным, для ее корректировки. Все операции с хронологиями и сигналом нужно производить после нормировки, т. к. при восстановлении исходного сигнала масштаб нарушается.

Другая модификация RC1SF метода, названная RSFi, или регионально ограниченный signal-free метод, в которой региональная кривая роста строится по SF-рядам измерений, приведенным к общему среднему, тестируется в работе (Björklund et al. 2013) на примере нескольких хронологий максимальной плотности из Швеции. RSFi сравнивается с RC1SF и SF методами. Показано, что использование этой модификации приводит к построению более гомогенных хронологий по различным наборам данных из одного региона.

#### ***2.1.1.5 Стандартизация на основе разложения по возрастному диапазону (ABD)***

Другим методом сохранения низкочастотного сигнала в древесно-кольцевых хронологиях является разложение по возрастному диапазону (Age Band Decomposition, ABD, Briffa et al. 2001). Для каждого возрастного диапазона (например, 0-20 лет, 21-40 лет, и т.д.) строится отдельная хронология, основанная только на годовых кольцах данного камбиального возраста. Затем все полученные хронологии нормируются и усредняются в

итоговую хронологию. Однако автор этого метода впоследствии отметил, что он имеет те же недостатки, что и RCS, и, к тому же, является менее обоснованным теоретически. Поэтому одинаково осторожно следует и использовать этот метод, и интерпретировать его результаты (Briffa and Melvin 2011, с. 140).

#### **2.1.1.6 Стандартизация на основе оценки площади годовых колец (СМ)**

Увеличение базальной площади годового кольца (Basal Area Increment, BAI) представляет собой более прямую оценку продуктивности, чем его ширина (Piovesan et al. 2005). Исходя из этого, Ф. Бионди и Ф. Кедан (Biondi and Qeadan 2008) предложили метод стандартизации, основанный на теоретической оценке ожидаемого радиального прироста в предположении о постоянном увеличении базальной площади и приближении контура поперечного среза ствола к окружности. Безусловно, это теоретически более обоснованный метод, чем эмпирическое приближение возрастной кривой отрицательной экспонентой или другой сглаживающей аналитической функцией. В работе (Biondi and Qeadan 2008) приводится формула для вычисления ожидаемого прироста  $Ew_t$  в год  $t$ . Метод стандартизации, названный авторами С-методом (далее СМ), сравнивался с RCS на примере площадки сосны остистой в северной Аризоне. Авторы показали, что методы продуцируют похожие хронологии и в целом превосходят «консервативные» методы стандартизации при оценке долгопериодных трендов прироста. В данном методе  $Ew_t$  рассчитывается для каждого дерева индивидуально. В настоящей работе также реализована и исследуется модификация С-метода, когда  $Ew_t$  рассчитывается не для индивидуальных деревьев, а для всей совокупности деревьев, аналогично методу RCS (далее Regional C-Method, RCM).

#### **2.1.2 Сравнение на наборах реальных данных**

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. Сравнение проводилось после 542 года, когда в обеих хронологиях число измеренных деревьев было больше пяти.

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. Чем лучше хронологии из соседних регионов коррелируют между собой, тем лучше они отражают реконструируемый параметр, т.е. летнюю температуру воздуха северной Фенноскандии. Сравнение проводилось после 139 г. н.э., когда в обеих хронологиях число измеренных деревьев было больше пяти.

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. Сравнение проводилось после 542 года, когда в обеих хронологиях число измеренных деревьев было больше пяти.

Во всех случаях сравнение производилось для исходных хронологий, а также для хронологий, сглаженных 200-летним сплайном. Сравнение сглаженных хронологий

позволяет оценить степень сохранения в них долгопериодной климатической изменчивости.

### 2.1.3 Сравнение на модельных данных

В настоящей работе была использована следующая методика моделирования «псевдо-рядов» измерений ширины и плотности годовых колец. Вначале на основе метода SF исходные данные измерений преобразовывались в ряды «очищенных от сигнала» измерений. Затем эти серии сглаживались кубическим сплайном с варьирующимся во времени сглаживанием (Melvin et al. 2007). Наконец, в каждую серию, посредством перемножения значений, добавлялся модельный климатический сигнал, т. е. каждое значение сглаженного ряда умножалось на заданное значение «климата» в соответствующий календарный год. Таким образом, мы получали набор данных, содержащий заранее известный климатический сигнал, и при этом сохраняли структуру исходного набора данных (без высокочастотной составляющей), т. е. количество, длину и распределение рядов во времени, а также их возрастные тренды. Были поставлены следующие эксперименты:

1) На основе набора данных по ширине годовых колец деревьев из Торнетреска проводилась генерация «псевдо-рядов» - данных, имеющих ту же структуру (количество, распределение во времени, возрастные тренды), но сгенерированных с модельным климатическим сигналом. Сигнал был выбран так, чтобы воспроизводить основные известные климатические события – Римский оптимум, похолодание во время Великого переселения народов, Средневековый оптимум, Малый ледниковый период и современное потепление (Клименко 2009). Как раз такими характеристиками обладает RCS хронология для данных по максимальной плотности годовых колец из северной Финляндии (FENN-RC2SFC), которая и была использована в качестве модельного климатического сигнала. Для каждого исследуемого метода построения хронологии проверялось среднее отклонение от модельного сигнала (после нормировки), а также корреляция с ним исходных и сглаженных 200-летним сплайном хронологий.

2) Для набора данных MXD для северной Финляндии сравнение проводилось по той же методике. В этом случае для генерации «псевдо-рядов» использовался набор данных по максимальной плотности годовых колец из северной Финляндии, а в качестве

климатического сигнала использовалась RCS хронология по ширине годовых колец деревьев из Торнетреска (TORN-TRW-RC2SFC). В обоих случаях период для сравнения – 7-2006 гг., для которого оба набора данных представлены измерениями более чем пяти деревьев.

## **2.2 Результаты и их обсуждение**

### **2.2.1 Сравнение хронологий ширины и максимальной плотности годовых колец для Торнетреска**

На рис. 2.1 показаны хронологии, построенные по ширине (TRW) и максимальной плотности (MXD) годовых колец для Торнетреска 11 различными методами стандартизации. В Таблице 2.1 показаны коэффициенты корреляции сглаженных 200-летним сплайном хронологий. Максимальную корреляцию показывают TRW-RC2SFC хронология для ширины и MXD-RC1 хронология для плотности ( $r=0,905$ , рис. 2.1). Если же брать только хронологии, построенные одним методом, то максимальную корреляцию показывают RC1SFC хронологии ( $r=0,856$ ). Для несглаженных хронологий (результаты не показаны), где высокочастотные колебания преобладают над низкочастотными, наилучшую корреляцию показывают, TRW-RC2SFC и MXD-RC1SFC хронологии ( $r=0,618$ ), построенные на основе модифицированного метода RCS.

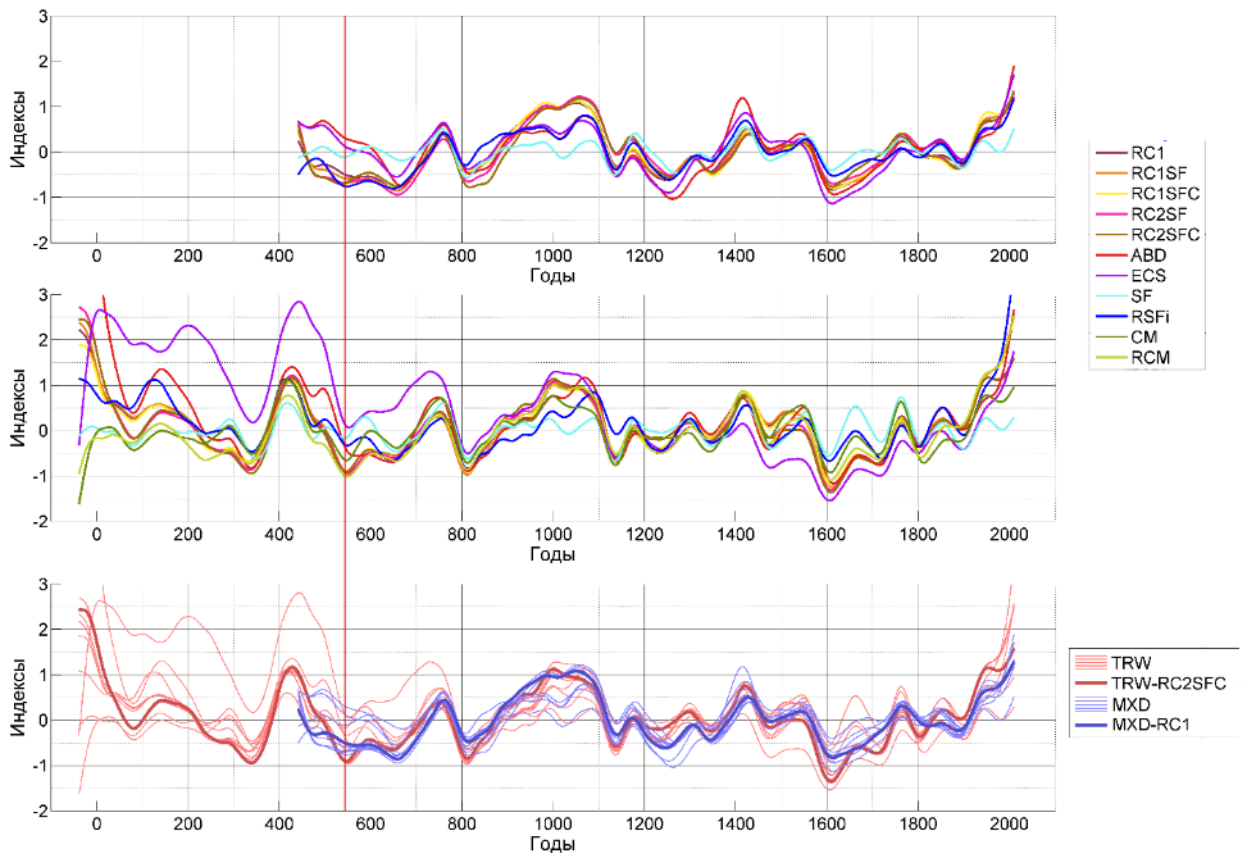


Рисунок 2.1 – Древесно-кольцевые хронологии, построенные различными методами стандартизации. Сглаживание 100-летними сплайнами: Сверху – хронологии максимальной плотности годичных колец из Торнетреска, северная Швеция (MXD); В центре – хронологии ширины годичных колец из Торнетреска (TRW); Снизу – сравнение хронологий по максимальной плотности и ширине годичных колец. Жирными линиями обозначены хронологии с лучшей корреляцией между собой при сглаживании 200-летними сплайнами. Вертикальная линия показывает 542 г., после которого проводилось сравнение.

Таблица 2.1.

Коэффициенты корреляции между сглаженными хронологиями ширины (TRW) максимальной плотности (MXD) годовых колец из северной Швеции (TORN). Сглаживание 200-летним сплайном. Период 542-2010 гг. Максимальное значение выделено подчеркиванием. Полужирным шрифтом также отмечено максимальное значение при использовании одного метода стандартизации.

	TRW RC1	TRW RC1SF	TRW RC1SFC	TRW RC2SF	TRW RC2SFC	TRW ABD	TRW ECS	TRW SF	TRW RSFi	TRW CM	TRW RCM
MXD RC1	0.852	0.855	0.862	0.889	<u>0.905</u>	0.857	0.535	0.341	0.724	0.828	0.896
MXD RC1SF	0.847	0.850	0.857	0.884	0.899	0.850	0.523	0.351	0.724	0.827	0.892
MXD RC1SFC	0.847	0.851	<b>0.856</b>	0.885	0.900	0.840	0.518	0.366	0.720	0.836	0.891
MXD RC2SF	0.808	0.811	0.818	0.843	0.854	0.813	0.429	0.356	0.741	0.761	0.854
MXD RC2SFC	0.811	0.814	0.820	0.837	0.844	0.816	0.466	0.392	0.764	0.777	0.849
MXD ABD	0.491	0.495	0.495	0.472	0.471	0.472	0.357	0.497	0.353	0.612	0.469
MXD ECS	0.806	0.808	0.815	0.825	0.833	0.800	0.363	0.332	0.678	0.783	0.860
MXD SF	0.729	0.729	0.742	0.698	0.707	0.718	0.477	0.198	0.625	0.712	0.721
MXD RSFi	0.807	0.808	0.814	0.802	0.813	0.806	0.632	0.160	0.635	0.785	0.791



### **2.2.2 Сравнение хронологий ширины годичных колец для Торнетреска и северной Финляндии**

На рис. 2.2 показаны хронологии, построенные по ширине годичных колец для Торнетреска (TORN) и финской Лапландии (LAPL). В Таблице 2.2 показаны коэффициенты корреляции сглаженных 200-летним сплайном хронологий. Максимальную корреляцию показывают TORN-RSF<sub>i</sub> хронология для Торнетреска и LAPL-RC2SFC хронология для Лапландии ( $r=0,701$ , Рис. 2.2). Если же брать только хронологии, построенные одним методом, то максимальную корреляцию показывают RSF<sub>i</sub> хронологии ( $r=0,678$ ). Для несглаженных хронологий (результаты не показаны), где высокочастотные колебания преобладают над долгопериодными, наилучшую корреляцию показывает SF метод ( $r=0,704$ ).

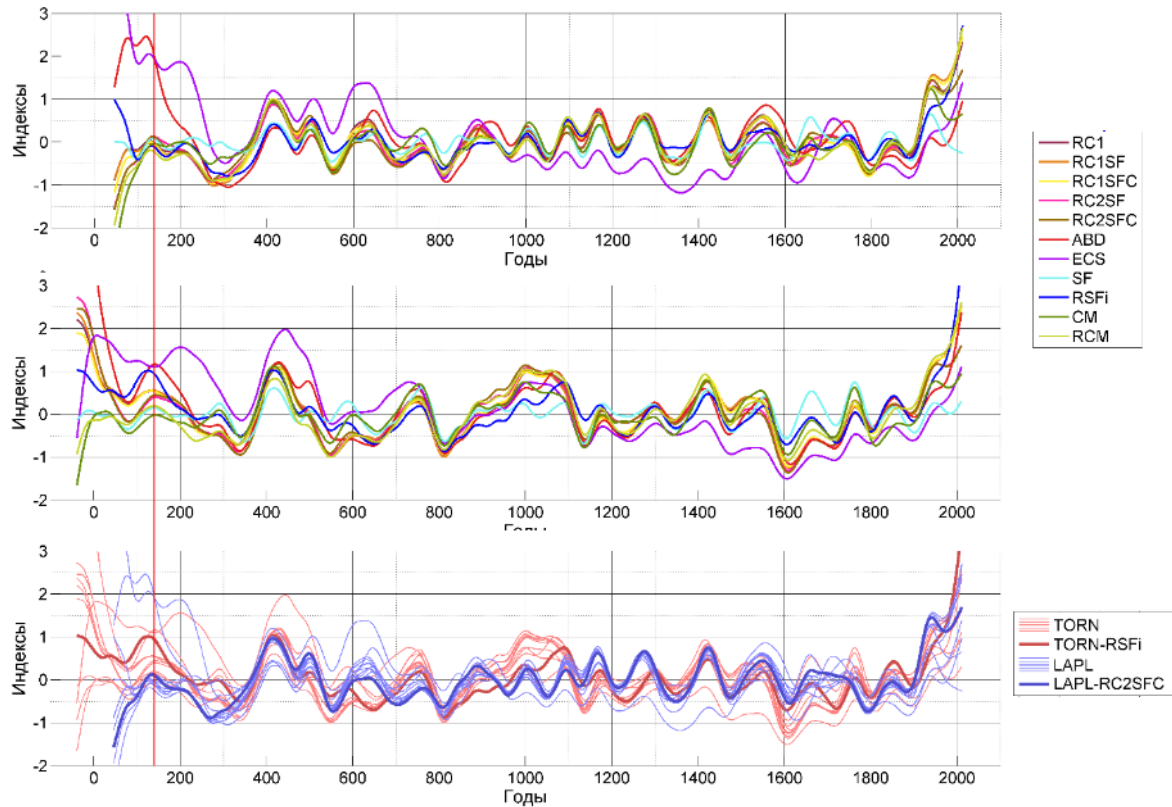


Рисунок 2.2. – Древесно-кольцевые хронологии, построенные разными методами стандартизации. Сглаживание 100-летними сплайнами: Сверху – хронологии ширины годичных колец из Лапландии, северная Финляндия (LAPL); По центру – хронологии ширины годичных колец из Торнетреска, северная Швеция (TORN); Снизу – сравнение хронологий годичных колец из Торнетреска и Лапландии. Жирными линиями обозначены хронологии с лучшей корреляцией между собой при сглаживании 200-летними сплайнами. Вертикальная линия показывает 139 г., после которого проводилось сравнение.

Таблица 2.2.

Коэффициенты корреляции между сглаженными хронологиями ширины годовых колец из северной Швеции (TORN) и финской Лапландии (LAPL). Сглаживание 200-летним сплайном. Период 139-2010 гг. Максимальное значение выделено подчеркиванием. Полужирным шрифтом также отмечено максимальное значение при использовании одного метода стандартизации.

	TORN RC1	TORN RC1SF	TORN RC1SFC	TORN RC2SF	TORN RC2SFC	TORN ABD	TORN ECS	TORN SF	TORN RSFi	TORN CM	TORN RCM
LAPL RC1	0.604	0.597	0.608	0.534	0.512	0.458	0.019	0.193	0.677	0.525	0.632
LAPL RC1SF	0.622	0.615	0.626	0.551	0.525	0.474	0.041	0.180	0.699	0.535	0.646
LAPL RC1SFC	0.609	0.603	0.614	0.536	0.510	0.464	0.027	0.186	0.697	0.523	0.637
LAPL RC2SF	0.649	0.643	0.654	0.599	0.578	0.508	0.040	0.270	0.699	0.551	0.675
LAPL RC2SFC	0.647	0.642	0.652	0.595	0.568	0.512	0.052	0.266	<b><u>0.710</u></b>	0.557	0.667
LAPL ABD	0.262	0.263	0.259	0.234	0.244	0.274	-0.060	0.310	0.236	0.202	0.226
LAPL ECS	0.052	0.058	0.035	0.011	0.018	0.263	0.673	0.114	0.220	0.086	-0.113
LAPL SF	0.647	0.134	0.141	0.192	0.187	0.026	0.010	0.307	0.114	0.255	0.183
LAPL RSFi	0.631	0.580	0.592	0.505	0.489	0.433	-0.075	0.215	<b>0.678</b>	0.425	0.621
LAPL CM	0.132	0.641	0.650	0.634	0.603	0.533	0.260	0.229	0.682	0.664	0.662
LAPL RCM	0.587	0.623	0.635	0.559	0.528	0.473	0.018	0.146	0.702	0.551	0.659

### 2.2.3 Сравнение хронологий максимальной плотности годичных колец для Торнетреска и северной Финляндии

На рис. 2.3 показаны хронологии, построенные по максимальной плотности годичных колец для Торнетреска (TORN) и северной Финляндии (FENN). В Таблице 2.3 показаны коэффициенты корреляции сглаженных 200-летним сплайном хронологий. Максимальную корреляцию показывают TORN-RC1SFC хронология для Торнетреска и FENN-RC2SFC хронология для северной Финляндии ( $r=0,595$ , Рис. 2.3).

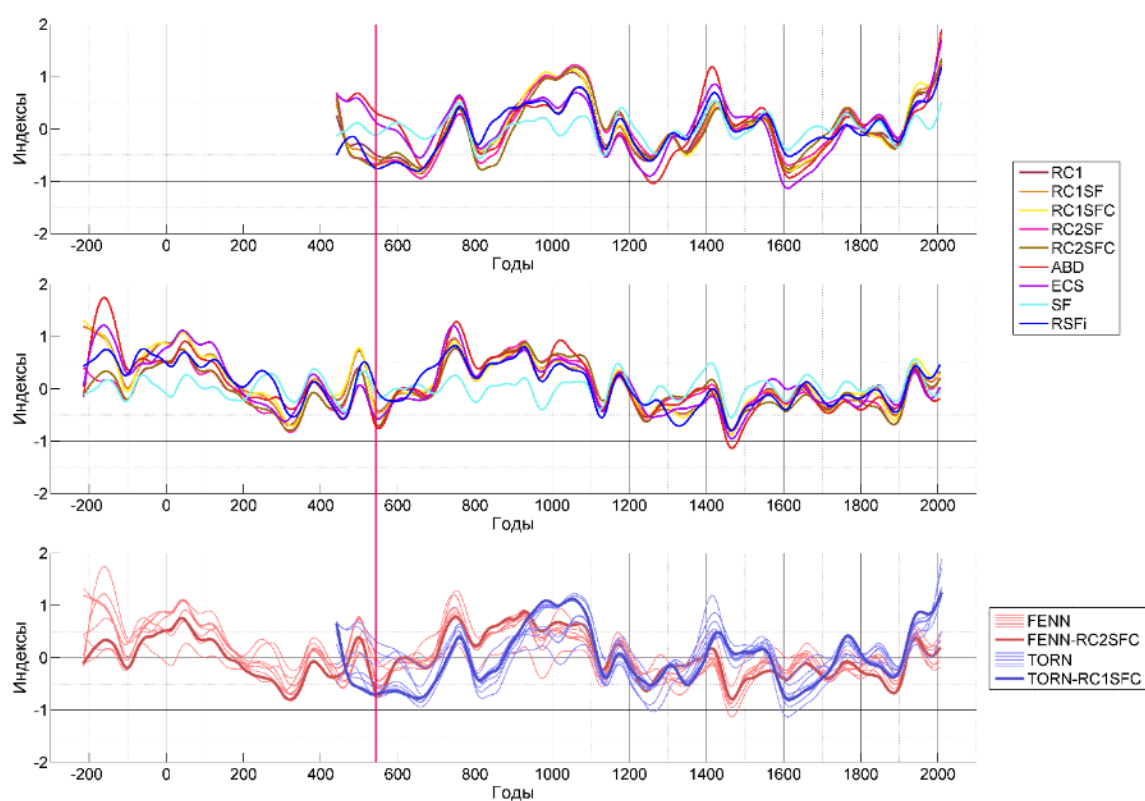


Рисунок 2.3 – Древесно-кольцевые хронологии, построенные разными методами стандартизации. Сглаживание 100-летними сплайнами: Сверху – хронологии максимальной плотности годичных колец из Торнетреска, северная Швеция (TORN); По центру – хронологии максимальной плотности годичных колец из северной Финляндии (FENN); Снизу – сравнение хронологий по максимальной плотности годичных колец из Торнетреска и северной Финляндии. Жирными линиями обозначены хронологии с лучшей корреляцией между собой при сглаживании 200-летними сплайнами. Вертикальная линия показывает 542 г., после которого проводилось сравнение.

Таблица 2.3.

Коэффициенты корреляции между сглаженными хронологиями максимальной плотности годовых колец из северной Швеции (TORN) и Финляндии (FENN). Сглаживание 200-летним сплайном. Период 542-2006 гг. Максимальное значение выделено подчеркиванием. Полужирным шрифтом также отмечено максимальное значение при использовании одного метода стандартизации.

	FENN RC1	FENN RC1SF	FENN RC1SFC	FENN RC2SF	FENN RC2SFC	FENN ABD	FENN ECS	FENN SF	FENN RSFi
TORN RC1	0.486	0.493	0.512	0.550	0.591	0.413	0.382	0.141	0.398
TORN RC1SF	0.492	0.499	0.520	0.553	0.591	0.415	0.390	0.139	0.405
TORN RC1SFC	0.497	0.504	<b>0.527</b>	0.550	<u>0.595</u>	0.412	0.394	0.140	0.415
TORN RC2SF	0.390	0.398	0.419	0.448	0.493	0.319	0.306	0.120	0.291
TORN RC2SFC	0.356	0.362	0.387	0.398	0.450	0.282	0.268	0.135	0.276
TORN ABD	0.252	0.253	0.257	0.288	0.328	0.144	0.118	0.114	0.209
TORN ECS	0.363	0.364	0.375	0.408	0.454	0.275	0.219	0.129	0.328
TORN SF	0.149	0.147	0.155	0.171	0.195	0.047	0.059	0.259	0.163
TORN RSFi	0.432	0.441	0.465	0.522	0.555	0.380	0.358	0.294	0.350

Если же брать только хронологии, построенные одним методом, то максимальную корреляцию показывают RC1SFC хронологии ( $r=0,527$ ). Для несглаженных хронологий (результаты не показаны), где высокочастотные колебания преобладают над долгопериодными, наилучшую корреляцию показывает RSFi метод ( $r=0,688$ ).

#### **2.2.4 Моделирование с заданным сигналом**

Результаты моделирования с заданным сигналом представлены на рис. 2.4 и в таблице 2.4. 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 результаты показал метод RC2SF, а метод RC2SFC – второй результат. Исключение составляют несглаженные хронологии по ширине годовых колец, где лучшие результаты показал SF, а следом за ним методы CM и RSFi. Интересно, что набор данных по максимальной плотности годовых колец показал гораздо лучшую синхронность хронологий с модельным сигналом, чем набор по ширине колец, что соотносится с лучшим воспроизведением температурного сигнала максимальной плотностью в реальных данных. 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 SF на сглаженных хронологиях. Это еще раз подтверждает плохую сохранность низкочастотных колебаний в хронологиях, построенных модифицированным SF методом.

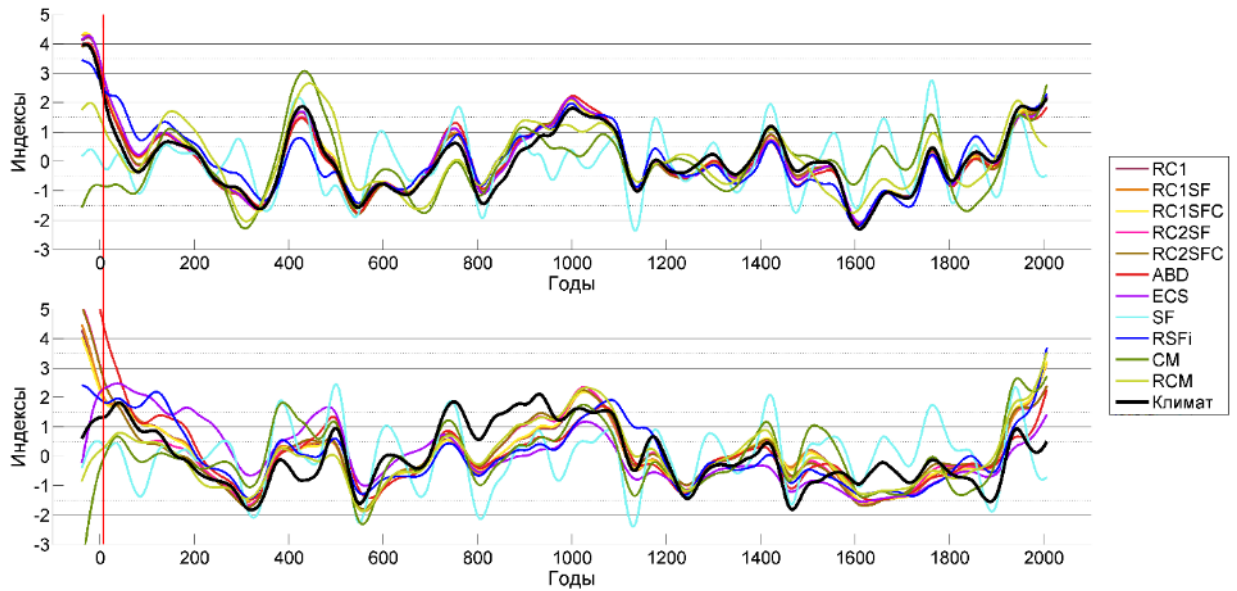


Рисунок 2.4 – Модельный климатический сигнал (черная линия) и хронологии, построенные по модельным данным различными методами (цветные линии). Сверху – данные по плотности FENN, климат по ширине TORN. Снизу – данные по ширине TORN, климат по плотности FENN. Сглаживание 100-летним сплайном. Вертикальная линия показывает 7 г. н.э., после которого проводилось сравнение.

Таблица 2.4.

Сходство реконструированного и реального климата по модельным данным. Период 7-2006 гг. Наилучшие значения выделены подчеркиванием.

Данные по плотности FENN, климат по ширине TORN											
	RC1	RC1SF	RC1SFC	RC2SF	RC2SFC	ABD	ECS	SF	RSFi	CM	RCM
Отклонение	0.0326	0.0276	0.0253	0.0251	<b><u>0.0248</u></b>	0.0419	0.0336	0.3347	0.0913	0.4193	0.2993
Отклонение 200-летнее сглаживание	0.0764	0.0654	0.0627	<b><u>0.0605</u></b>	0.0613	0.1068	0.0825	1.6882	0.2374	0.9578	0.329
Корреляция	0.984	0.986	0.987	0.987	<b><u>0.988</u></b>	0.979	0.983	0.833	0.954	0.790	0.850
Корреляция 200-летнее сглаживание	0.962	0.967	0.969	<b><u>0.970</u></b>	0.969	0.947	0.959	0.156	0.881	0.521	0.835
Данные по ширине TORN, климат по плотности FENN											
	RC1	RC1SF	RC1SFC	RC2SF	RC2SFC	ABD	ECS	SF	RSFi	CM	RCM
Отклонение	0.3349	0.3416	0.3158	0.2813	0.2778	0.3783	0.6451	<b><u>0.1769</u></b>	0.2622	0.2343	0.3107
Отклонение 200-летнее сглаживание	0.6002	0.5988	0.5765	0.4417	<b><u>0.4271</u></b>	0.5897	0.9958	2.2052	0.72	1.1767	0.5117
Корреляция	0.833	0.829	0.842	0.859	0.861	0.811	0.677	<b><u>0.912</u></b>	0.869	0.883	0.751
Корреляция 200-летнее сглаживание	0.700	0.701	0.712	0.779	<b><u>0.786</u></b>	0.705	0.502	-0.103	0.640	0.411	0.744



## 2.3 Выводы к главе 2

- 1) Ни один из одиннадцати исследованных методов не показал лучшие результаты во всех проведенных экспериментах в смысле выбранных критериев оценки производительности методов. Тем не менее, можно выделить следующие закономерности. Наилучшие результаты при восстановлении долгопериодной изменчивости в проведенных экспериментах показали различные модификации метода RCS – с одной и с двумя региональными кривыми роста, с методом SF и с корректировкой, а также модификация RSFi.
- 2) При восстановлении высокочастотной изменчивости метод SF может превзойти RCS, что подтверждается лучшими результатами для несглаженных данных в эксперименте с данными по ширине колец и модельным климатом.
- 3) Из всех исследованных методов, связанных с RCS, наименее убедительные результаты продемонстрировали ECS и ABD. Следует заметить, что именно эти методы являются наименее теоретически обоснованными, из-за чего критиковались в последующих публикациях.
- 4) Впервые описанный метод RCM – региональная модификация C-метода стандартизации на основе расчета площади годовых колец – показал превосходство над C-методом в восстановлении долгопериодной изменчивости. Это его свойство может быть использовано в исследованиях, где основным параметром изучения является площадь годового кольца, например в исследованиях долговременных изменений продуктивности лесов.
- 5) Проведенные эксперименты не подтверждают результатов К. Анчукайтиса с соавторами (Anchukaitis et al. 2013) о том, что модифицированный метод SF может восстанавливать долгопериодную климатическую изменчивость лучше, чем методы на основе RCS. Напротив, полученные результаты говорят о потере большей части низкочастотного сигнала в SF-хронологиях годовых колец.

## **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 данной главе 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.

### **3.1 Введение**

Чтобы продемонстрировать, что серии измерений параметров годовых колец могут содержать вариации в масштабе тысячелетия, а также что эти вариации могут быть использованы для извлечения информации о долгопериодной изменчивости климата прошлого, в данной главе проанализированы два набора данных о плотности годовых колец (MXD) из северных районов Финляндии и Швеции (Esper et al. 2012b; Melvin et al. 2013), известных высокой чувствительностью к летней температуре воздуха. Эти данные сыграли важную роль в ряде региональных и полушарных температурных реконструкций для позднего голоцена (например, Jones et al. 1998; Esper et al. 2002; Osborn and Briffa 2006; Mann et al. 2009; Ljungqvist et al. 2012). Анализ проводится с использованием уникального дендроклиматического метода, позволяющего непосредственно преобразовывать исходные серии измерений годовых колец в палеоклиматические реконструкции. Метод основан на «поверхности отклика», трехмерной (3D) трансфер-функции, которая строится в пространстве измерений годовых колец, камбиального возраста годовых колец (т.е. возраста дерева на момент образования данного кольца) и климатического параметра. Таким образом, каждое исходное значение измеренного параметра годового кольца непосредственно преобразуется в оценку климатического параметра, в данном случае, летней температуры воздуха. Метод был назван методом прямой реконструкции (DIRECT).

Методы с применением 3D поверхности отклика ранее применялись в исследованиях с использованием ширины годичных колец (ШГК), содержания стабильных изотопов и высоты деревьев в качестве размерностей пространства (Graumlich and Brubaker 1986; Graumlich 1991, 1993; Edwards et al. 2000; Salminen 2009). Метод DIRECT представляет собой первую попытку использовать 3D-поверхность в палеоклиматическом контексте с акцентом на низкочастотную изменчивость. Здесь также продемонстрирован потенциал 3D-поверхностей в качестве объективного метода для устранения возрастных трендов из исходных серий измерений параметров годичных колец с целью получения информации о климате прошлого с ненарушенной частотной структурой.

## **3.2 Материалы и методы**

### **3.2.1 Древесно-кольцевые данные**

Использовались два набора данных MXD годичных колец сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из северных районов Финляндии и Швеции, между 69° и 67° северной широты и 18° и 29° восточной долготы, содержащих измерения годичных колец живых и погребенных деревьев (Esper et al. 2012b; Melvin et al. 2013). Полевые работы, места отбора образцов и детали микроденситометрического анализа на основе рентгеновского излучения, использованного для получения исходных серий измерений MXD, описаны в оригинальных публикациях (Grudd 2008; Esper et al. 2012b; Melvin et al. 2013). Набор данных включает 430 серий и охватывает период между 216 годом до н.э. и 2010 годом н.э., репликация более пяти серий достигается после 8 года до н.э.

### **3.2.2 Основная концепция и описание метода DIRECT**

Обычно процесс дендроклиматической реконструкции проходит в четыре этапа. Во-первых, проводится детрендинг перекрестно-датированных серий измерений годичных колец. Этот процесс переводит исходные серии измерений годичных 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. Реже используются нелинейные подходы к оценке дендроклиматических зависимостей, в том числе нейронные сети (Woodhouse 1999; Helama et al. 2009a), которые обладают способностью приспосабливаться к любой нелинейности взаимосвязей между климатом и приростом. 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. 3.1А). Форма 3D-поверхности контролируется осями независимых переменных: значениями параметров годовых колец и их камбиальным возрастом, а также осью зависимой переменной – реконструируемым климатическим параметром (рис. 3.1Б).

Использование камбиального возраста в качестве одной из объясняющих переменных упрощает преобразование данных о годовых кольцах деревьев в оценки изменчивости климата. Во-первых, построение средней хронологии не требуется, поскольку значения параметров годовых колец включаются в калибровочную модель в виде отдельных единиц; каждое значение представляет параметр отдельного годового кольца, с известным камбиальным возрастом и календарным годом формирования. Из-за отсутствия этапа осреднения в обобщенную хронологию, для моделирования трансфер-функции доступно большее количество значений параметров колец по сравнению с традиционным подходом, при котором количество значений параметра эквивалентно продолжительности периода калибровки. Кроме того, нет необходимости в обрезании рядов измерений годовых колец для устранения неклиматической изменчивости (например, ювенильный период). Вместо этого зависимость параметров годовых колец от возраста дерева включается в трансфер-функцию одновременно с зависимостью параметров годовых колец от климата.

Процесс дендроклиматической реконструкции методом DIRECT проходит в четыре этапа.

### *Первый этап - Построение 3D-поверхности*

Первым этапом метода является построение поверхности, которая служит 3D-представлением зависимости параметров годовых колец от изменчивости климата в зависимости от возраста дерева (рис. 3.1Б). Для каждого годового кольца, образовавшегося в течение инструментального периода, значение измеренного параметра, в данном случае MXD, его камбиальный возраст и значение климатического параметра в год его формирования, в данном случае температура июня-августа, используются для определения местоположения этого кольца в трехмерном пространстве. Затем полученное облако данных, в котором каждая точка представляет одно годовое кольцо, сформированное в течение инструментального периода (т.е. периода с доступной климатической информацией), сглаживается с помощью тонкопластинчатого сглаживающего сплайна (Duchon 1977) для построения 3D-поверхности. В данном случае сглаживание выполнялось с помощью Matlab® Curve Fitting Toolbox и функции `trapz`.

Жесткость сглаживающей поверхности регулируется параметром сглаживания  $p$ , который представляет собой число от 0 до 1, при этом сглаживающий сплайн изменяется от аппроксимации данных методом наименьших квадратов линейным полиномом при  $p$  равном 0, до интерполяции тонкопластинчатого сплайна к данным при  $p$  равном 1. Для выбора оптимального значения параметра  $p$ , и исключения перенастройки (пример перенастройки показан на рис. ПЗ.1, все рисунки и таблицы с префиксом П находятся в Приложении), была использована перекрестная верификация. Для построения поверхности использовались многократно сгенерированные выборки основанные на 50% всех доступных данных, а оптимальное значение параметра было оценено на оставшихся 50% данных. Для использованного набора данных итоговое значение параметра  $p$  было оценено как  $8 \times 10^{-7}$ .

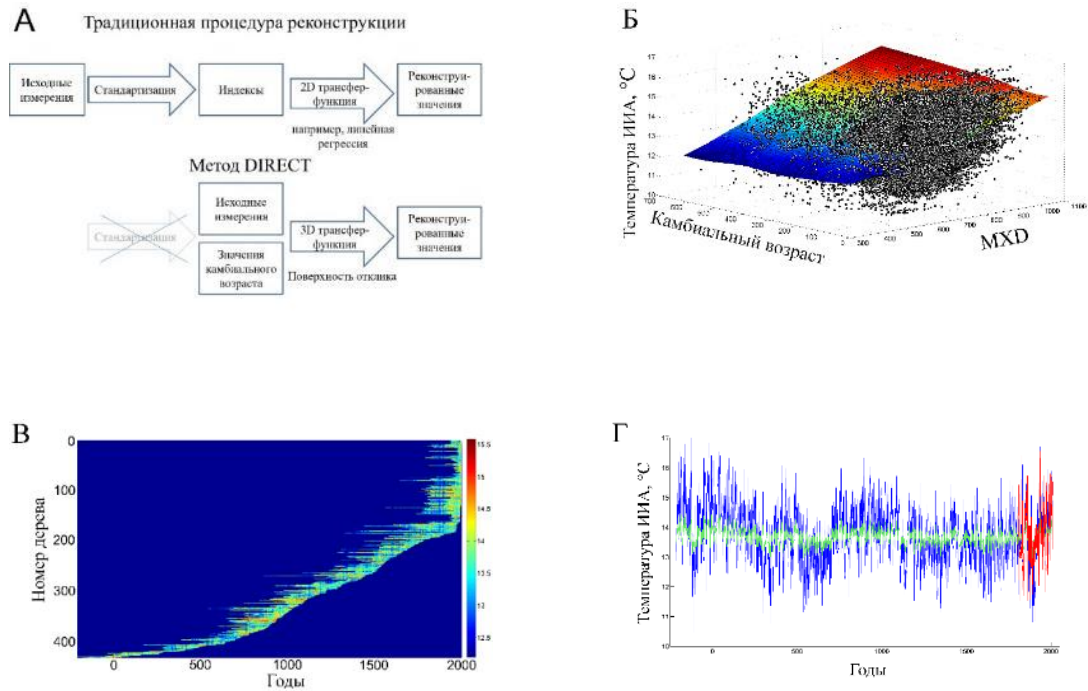


Рисунок 3.1 – Алгоритм метода DIRECT и пример его применения к набору данных максимальной плотности годовых колец сосны обыкновенной из северной Фенноскандии. А – Концепция метода DIRECT в сравнении с традиционной процедурой реконструкции по данным годовых колец деревьев; Б – Трехмерная поверхность в 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 годовичного кольца сглажено 3D-поверхностью (цветная); В – 3D трансфер-функция используется для преобразования значения измеренного параметра (MXD) каждого отдельного годовичного 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).

***Второй этап - Восстановление значений климатического параметра для отдельных годовых колец***

После построения 3D-поверхности в качестве трансфер-функции следующим этапом метода DIRECT является преобразование измеренных параметров отдельных годовых колец в оценки климатического параметра (рис. 3.1В). Каждое годовое кольцо, представленное его значением MXD и камбиальным возрастом, используется для получения оценки температуры июня-августа для соответствующего календарного года. На этом этапе значения максимальной плотности и камбиального возраста математически эквивалентны по своему влиянию на восстанавливаемую температуру; таким образом, не требуется никакой специальной процедуры для устранения влияния возраста.

***Третий этап - Усреднение по годам***

На следующем этапе метода DIRECT восстановленные оценки климатического параметра для каждого календарного года усредняются в единый временной ряд (рис. 3.1Г).

***Четвертый этап - Масштабирование***

Четвертым и последним этапом является масштабирование годовой изменчивости полученной реконструкции климатического параметра. По сравнению с традиционным дендроклиматическим подходом, в методе DIRECT усреднение дендрохронологических серий производится *после того*, как они были преобразованы в оценки климатического параметра. Известно, что недостаток корреляции между подобными рядами приводит к занижению дисперсии в усредненных временных рядах (Osborn et al. 1997). Это, в частности, происходит из-за сглаживания исходных данных с помощью 3D-поверхности (этап 1). Поэтому полученные временные ряды усредненных оценок климатического параметра необходимо масштабировать, чтобы задать среднее значение и дисперсию, равные их значениям для инструментальных данных (рис. 3.1Г). В данном случае было применено масштабирование для исходных и для сглаженных рядов с использованием 15-летнего скользящего среднего (Lee et al. 2008). Среднее значение и дисперсия были оценены для осредненного реконструированного ряда и для инструментальных температур за период калибровки. Затем реконструированный ряд был масштабирован, чтобы его среднее значение и стандартное отклонение соответствовали соответствующим значениям инструментальных температур. Параметры оценивались по сглаженным временным рядам.

### 3.2.3 Оценка неопределенностей реконструированных значений

Оценка была основана на предположении, что неопределенности в реконструкции температуры проистекают из двух независимых источников. Первый тип неопределенности связан с репликацией дендрохронологических данных, а второй – с неоднородностью инструментального периода. Инструментальный период используется для моделирования 3D-поверхности, и в связи с этим его неоднородность влияет на неопределенность реконструкции за весь период. Оценка была выполнена с использованием процедуры бутстреппинга (т.е. многократной генерации выборки со случайной заменой некоторых ее элементов), адаптированной к использованию с методом DIRECT. Проводилась повторная генерация выборки с заменой, всего 1000 итераций. В случае первого типа неопределенности полная выборка состояла из восстановленных значений температуры июня-августа, которые были получены для всей совокупности годовых колец, образовавшихся за каждый календарный год. В случае второго типа неопределенности полная выборка включала все годы инструментального периода, соответствующие температуры и кольца деревьев, сформированные за эти годы. Необходимо отметить, что неопределенность второго типа может быть оценена только для доинструментального периода, поскольку инструментальный период используется для проведения расчетов. Таким образом были получены бутстреп-распределения статистики. Были использованы процентиля  $\alpha/2 \times 100$  и  $(1-\alpha/2) \times 100$  этого распределения для оценки доверительных интервалов при  $\alpha = 0,05$ . Чтобы оценить неопределенность, происходящую из обоих источников, для вычисления окончательного 95% доверительного интервала использовалось значение  $\alpha = (0,05)^{0,5}$  в предположении, что неопределенности двух типов независимы.

### 3.2.4 Калибровка и верификация

Инструментальный период (1802-2010 гг.) был разделен на ранний (1802-1906 гг.) и поздний (1907-2010 гг.) периоды, которые использовались в качестве периодов калибровки и верификации (с последующим обменом) для получения реконструкции летней температуры воздуха. Таким образом, оценка качества реконструкции, построенной с использованием метода DIRECT, соответствует общепринятым подходам к оценке качества палеоклиматических реконструкций на основе годовых колец. Оценивались значения следующих статистик: коэффициент детерминации ( $R^2$ ), коэффициент



корреляции Пирсона ( $r$ ), коэффициент уменьшения ошибки (RE), коэффициент эффективности (SE) и среднеквадратическая ошибка (СКО) (Cook et al. 1994).

### **3.2.5 Оценка долгосрочных тенденций изменения температуры**

Поскольку выявление долгопериодных климатических изменений в древесно-кольцевых реконструкциях является одной из основных целей данной работы, и поскольку тысячелетние температурные тренды, отражающие изменение орбитального форсинга, представляют особый интерес для дендроклиматических исследований (Mann et al. 1999; Esper et al. 2012b, 2014; Helama et al. 2012), в полученной реконструкции была проведена оценка долговременных линейных трендов. Для учета неопределенности в исходных данных, оценка трендов была проведена при помощи генерация одной тысячи реконструкций методом бутстреппинга с заменой. На каждой итерации использовался случайный набор серий измерений годовых колец. Линия тренда была оценена для каждого из сгенерированных наборов (1000 раз), что позволило оценить неопределенность в отношении долгосрочного тренда. Оценки трендов летней температуры были сопоставлены с ранее полученными оценками на основе дендроклиматических исследований в данном регионе (Esper et al. 2012b, 2014; Melvin et al. 2013).

### **3.2.6 Сравнение с реконструкцией температуры на основе RCS**

Реконструкция температуры на основе метода DIRECT сравнивалась с реконструкцией, построенной на основе традиционного дендроклиматического подхода, а именно метода RCS. Сглаживание региональной кривой роста было выполнено с использованием сплайна с изменяемой жесткостью (Melvin et al. 2007), в котором жесткость сплайна для каждого года эквивалентна камбиальному возрасту в годах плюс пятнадцать лет, и на этой длине волны используется 50% сглаживание по дисперсии (Cook and Peters 1981). Все исходные серии измерений MXD были поделены на полученную региональную кривую роста, а средняя хронология была вычислена путем усреднения полученных таким образом индексов. Реконструкция температуры получена путем масштабирования средней хронологии относительно инструментальных данных с использованием метода (Lee et al. 2008): во-первых, 15-летнее скользящее среднее было использовано для сглаживания ДКХ и температурного ряда; во-вторых, среднее значение и дисперсия были оценены для обоих сглаженных временных рядов за период калибровки; в-третьих, хронология была

масштабирована к температурному ряду с использованием параметров, оцененных по сглаженным временным рядам.

### **3.3 Результаты**

#### **3.3.1 Отклик максимальной плотности на температуру в зависимости от возраста**

Изучение изменения связи температуры и MXD в трехмерном пространстве при изменении камбиального возраста позволяет обнаружить ее нелинейность. Срезы трехмерной поверхности (рис. 3.1Б) поперек оси камбиального возраста показывают, что возраст отчетливо влияет на изменение формы зависимости максимальной плотности от температуры (рис. 3.2). Кольца моложе 150 лет демонстрируют заметную нелинейность в их реакции на среднюю температуру лета. По-видимому, максимальная плотность колец заметно не увеличивается у молодых деревьев до тех пор, пока температура не поднимется выше 13 °С. Ниже этого порога у деревьев моложе 150 лет наблюдается слабый отклик MXD на температуру.

Аналогичная особенность наблюдается и у более старых сосен. В возрастной категории деревьев от 151 до 400 лет связь температуры с MXD более умеренная при среднелетних температурах ниже 13,5°С, по сравнению с реакцией MXD на температуру выше этого порога. Это также 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. 3.2) 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.

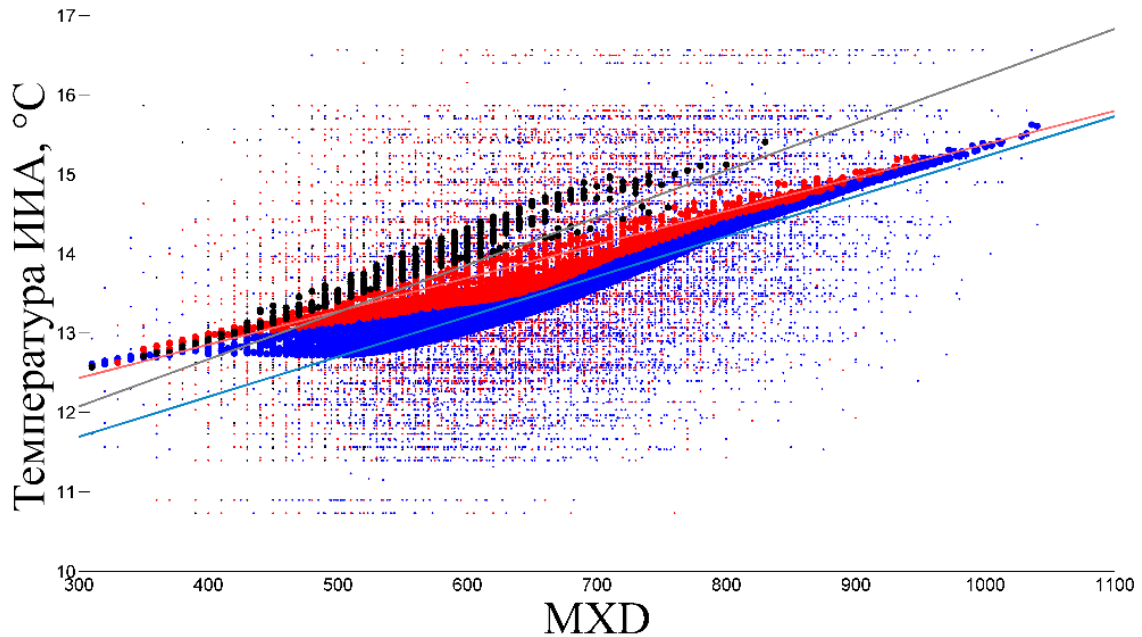


Рисунок 3.2 – Иллюстрация соотношения температуры и максимальной плотности (MXD) для трех различных возрастных классов (синие точки для годовичных колец с камбиальным возрастом от 1 до 150 лет, красные точки – от 151 до 400 лет и черные точки – старше 400 лет). Маленькие точки показывают отдельные значения 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).

### 3.3.2 Реконструкция температуры на основе метода DIRECT

Температурные реконструкции на основе метода DIRECT были получены с использованием двух подходов: масштабирования и масштабирования на основе сглаженных рядов. Результаты калибровки и верификации показали, что реконструкция объясняет от 55 до 62% изменчивости инструментального ряда температур за периоды 1802–1906 гг. и 1907–2010 гг. (таблица 3.1). Масштабирование на основе сглаженных рядов привело к увеличению коэффициентов детерминации ( $R^2$ ), рассчитанных за те же периоды.

Коэффициент уменьшения ошибки (RE) и коэффициент эффективности (CE) демонстрируют положительные значения, что говорит о хорошем качестве реконструкций и об их прогностической способности (Cook et al. 1994).

Для полного инструментального периода (1802–2010 гг.) реконструкция среднего значения объяснила 60% дисперсии инструментального ряда температуры с использованием масштабирования и 64% дисперсии с использованием масштабирования на основе сглаженных рядов. Кроме того, значения СКО для второго подхода были меньше, чем для первого подхода. Поэтому именно масштабирование на основе сглаженных рядов было применено на четвертом этапе метода DIRECT для получения итоговой реконструкции температуры июня-августа и для последующих сравнений.

Полученная реконструкция на основе метода DIRECT хорошо воспроизводит изменчивость инструментального ряда температуры (рис. 3.3А). Реконструкция также показывает значительную изменчивость среднелетних температур за последние 2000 лет (рис. 3.3Б).

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. Аналогичные особенности долговременных изменений реконструированных температур наблюдаются в экспериментальных реконструкциях, в которых моделирование 3D-поверхности выполнялось с использованием различных параметров сглаживания (рис. ПЗ.1, ПЗ.2), различных периодов калибровки (рис. ПЗ.3) и различного количества использованных деревьев (т.е. подмножеств полного набора данных) (рис. ПЗ.4).

Таблица 3.1.

Статистика калибровки и верификации для реконструкции методом DIRECT. Показаны коэффициент детерминации за весь период ( $R^2$ ) и за период калибровки ( $R^2_c$ ), коэффициент уменьшения ошибки (RE) и коэффициент эффективности (CE), коэффициент корреляции за весь период ( $r$ ) и за период верификации ( $r_v$ ), а также корень из среднеквадратической ошибки за весь период (RMSE), за период калибровки ( $RMSE_c$ ) и за период верификации ( $RMSE_v$ ). Для каждого периода калибровка выполнялась два раза – на основе исходных серий и на основе сглаженных серий.

Период калибровки		$R^2$	$R^2_c$	$r$	$r_c$	$r_v$	RE	CE	RMSE	$RMSE_c$	$RMSE_v$
1802-2010	Масштабирование	0.60	0.60	0.80	0.80	-	-	-	0.73	0.73	-
	Масштабирование по сглаженным сериям	0.64	0.64	0.80	0.80	-	-	-	0.70	0.70	-
1802-1906	Масштабирование	0.59	0.55	0.80	0.78	0.78	0.68	0.56	0.74	0.76	0.71
	Масштабирование по сглаженным сериям	0.62	0.59	0.79	0.77	0.78	0.70	0.59	0.71	0.73	0.69
1907-2010	Масштабирование	0.59	0.57	0.80	0.79	0.77	0.66	0.54	0.74	0.70	0.77
	Масштабирование по сглаженным сериям	0.62	0.62	0.79	0.79	0.76	0.67	0.56	0.71	0.66	0.76

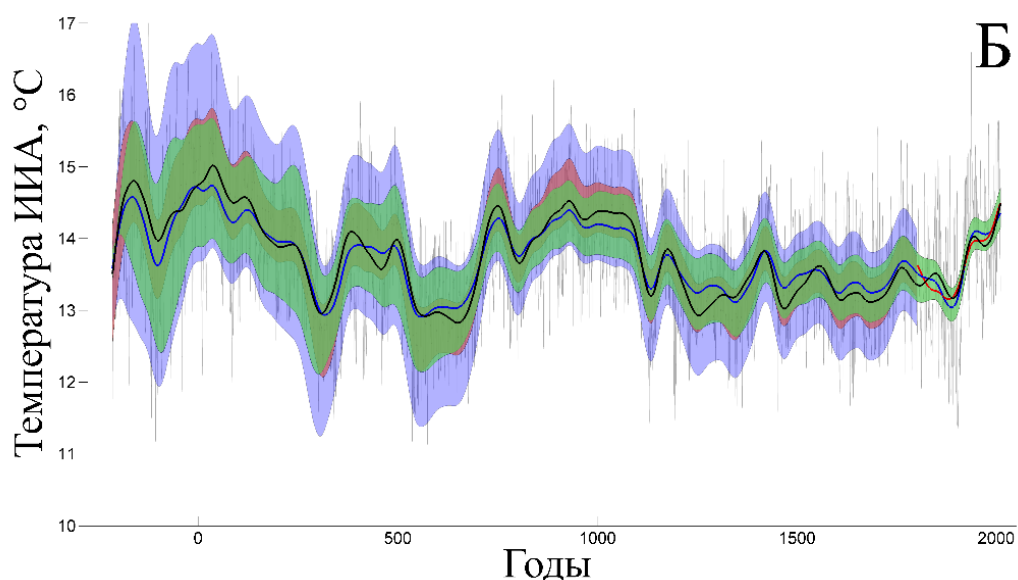
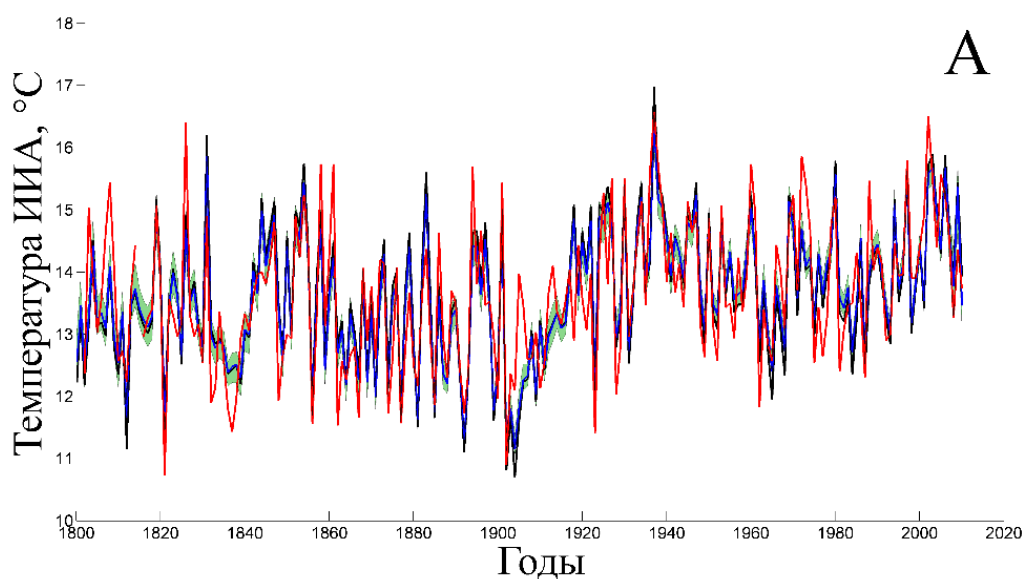


Рисунок 3.3 – Инструментальный ряд температур июня-августа (красный), реконструкция DIRECT (синий) и реконструкция RCS (черный), а также неопределенности реконструкции методом DIRECT: неопределенность репликации данных (зеленая заливка), неопределенность инструментального периода (красная заливка) и комбинированная неопределенность (синяя заливка). А – Инструментальный период. Б – Полный период реконструкции. Ряды сглажены 100-летними сплайнами. Несглаженная реконструкция DIRECT показана серым цветом.

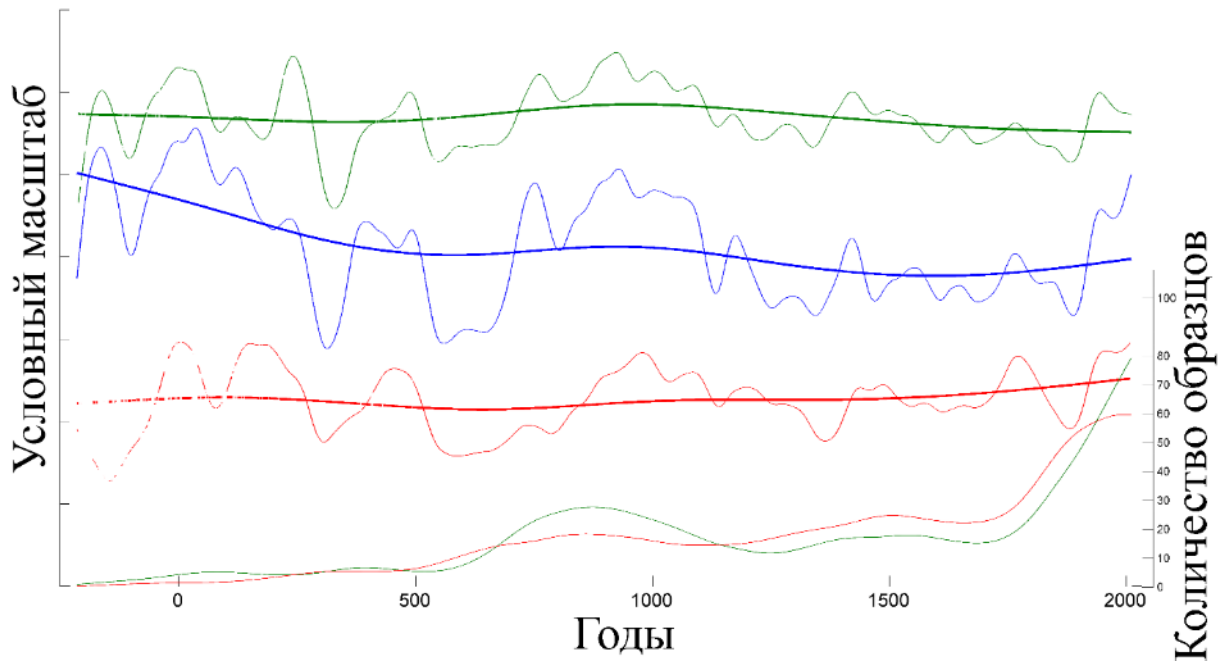


Рисунок 3.4 – Сравнение реконструкций DIRECT, основанных на высоких (зеленый) и низких (красный) значениях MXD, в сравнении с реконструкцией DIRECT, основанной на всей совокупности значений MXD (синий). Снизу показана репликация колец с высокой (зеленый) и низкой (красный) плотностью. Четвертый этап алгоритма DIRECT (масштабирование) опущен для улучшения визуального сравнения. Исходные временные ряды сглажены 100-летними и 300-летними сплайнами.

Ряд существенных различий в реконструированных температурах отмечается для двух альтернативных реконструкций на основе метода DIRECT, использующих только высокие и низкие значения MXD (рис. 3.4). 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 годовичных 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 (также см. рис. 1.2). Ранее вариации долгопериодной изменчивости предлагалось также исследовать для различных возрастных групп годовичных колец (Briffa et al. 2001; Esper et al. 2009), но пример ее возникновения за счет колебания количества образцов с разными средними значениями измеренного параметра, насколько мне известно, приводится здесь впервые.

### 3.3.3 Сравнение реконструкций на основе методов DIRECT и RCS

Реконструкция температуры последних двух тысячелетий, полученная на основе метода DIRECT, имеет некоторые отличия от реконструкции на основе RCS, полученной по идентичным данным. При этом за инструментальный период две реконструкции очень похожи (рис. 3.3). Коэффициент корреляции Пирсона между реконструкциями за этот период составляет 0,983. В дополнение к визуальному сравнению две реконструкции можно сравнить по их корреляции с инструментальным рядом температуры. За ранний период реконструкции на основе DIRECT и RCS объясняют 59% и 58% дисперсии соответственно, тогда как за поздний период этот показатель составляет 62% и 60%, соответственно (таблица 3.1). За весь инструментальный период реконструкции на основе DIRECT и RCS объясняют 64% и 62%, соответственно (см. таблицу 3.1). Хотя эти показатели близки, значения указывают на небольшое улучшение статистики  $R^2$  при использовании метода DIRECT.

Реконструкции на основе DIRECT и RCS остаются сопоставимыми в течение первого (1–1000 гг. н.э.) и второго (1001–2000 гг. н.э.) тысячелетий с взаимной корреляцией 0,986 для обоих периодов. В обеих реконструкциях самые холодные годы пришлись на 574 год н.э., в то время как самые теплые годы пришлись на 1937 год н.э. и 125 год до н.э. для реконструкций основе DIRECT и RCS соответственно. Максимальная абсолютная разница между реконструкциями составила 1,2°C (для 1453 года н.э.).



Эти статистические данные получены для межгодовой изменчивости восстановленных температур, сравнение же низкочастотной изменчивости также выявляет ряд различий между двумя реконструкциями. Самыми теплыми 30-летними периодами для реконструкций на основе DIRECT и RCS были 23–52 н.э. и 21–50 н.э. соответственно, в течение которых восстановленные температуры оставались на  $1,26^{\circ}\text{C}$  и на  $1,68^{\circ}\text{C}$  выше, чем средние температуры за период 1901–2000 гг. н.э. в соответствующих реконструкциях. Самыми холодными 30-летними периодами являются 536–565 гг. н.э. и 1452–1481 гг. н.э. соответственно, в течение которых температуры в обоих случаях оставались на  $1,18^{\circ}\text{C}$  ниже, чем средняя температура 20-го века. Разница между самым теплым 30-летним периодом и самым холодным 30-летним периодом для двух реконструкций выражается в амплитудах температур  $2,42^{\circ}\text{C}$  и  $2,86^{\circ}\text{C}$ , что свидетельствует о более значительных реконструированных колебаниях климата при использовании метода RCS.

Аналогичное сравнение было проведено с использованием 100-летних периодов. В то время, как реконструкция методом DIRECT показала самый теплый столетний интервал в период 25–124 гг. н.э., реконструкция на основе RCS показала самый теплый период с 31 г. до н.э. по 70 г. н.э. Для этих интервалов отклонения температуры показали значения на  $0,87^{\circ}\text{C}$  и  $1,12^{\circ}\text{C}$  выше по сравнению с периодом 1901–2000 гг. н.э. Самые холодные 100-летние периоды пришлось на 536–635 гг. н.э. и 572–671 гг. н.э., в течение которых температуры на основе DIRECT и RCS оказались на  $0,91^{\circ}\text{C}$  и на  $0,9^{\circ}\text{C}$  холоднее, чем в 20 веке. Соответствующие температурные амплитуды  $1,79^{\circ}\text{C}$  и  $2,02^{\circ}\text{C}$  также демонстрируют более значительные колебания реконструированных температур при использовании метода RCS. Максимальные различия между 100-летними периодами на основе DIRECT и RCS составляют  $+0,24^{\circ}\text{C}$  для 1206–1305 гг. н.э.,  $-0,28^{\circ}\text{C}$  для 105–5 гг. до н.э. и 22–121 гг. н.э.

### 3.3.4 Сравнение долгосрочных температурных трендов

При сравнении двух реконструкций за последние два тысячелетия более сильное долгосрочное понижение температуры (отрицательный линейный тренд) для различных временных интервалов наблюдалось для реконструкции на основе RCS (таблица 3.2). Эти тренды оцениваются как похолодание примерно на  $0,6^{\circ}\text{C}$  (значимое на уровне  $\alpha=0,05$ ) в течение двух тысячелетий для реконструкции на основе DIRECT (рис. ПЗ.5) и на  $0,8^{\circ}\text{C}$  для реконструкции методом RCS. За последние 1500 лет признаки длительного похолодания также сильнее проявляются для реконструкции на основе RCS (таблица 3.2).

Таблица 3.2.

Сравнение оценок линии тренда, сделанных для разных временных интервалов и реконструкций. Оценки линий тренда для предыдущих реконструкций N-Eur и N-Scan (Esper et al. 2012b, 2014) были взяты из (Esper et al. 2014). Все оценки линии тренда были приведены к градусам Цельсия за 1000 лет.

Период	Значение тренда, °C за 1000 лет					
	RCS (данное исследование)	DIRECT (данное исследование)	Matskovsky and Helama, 2014	N-Eur (Esper et al., 2014)	N-Scan (Esper et al., 2012)	Torn (Melvin et al., 2013)
216 г. до н.э. – 2010 г. н.э.	-0.42	-0.31	-0.25			
138 г. до н.э. – 2010 г. н.э.	-0.39	-0.29	-0.25			
138 г. до н.э. – 2010 г. н.э.	-0.48	-0.38	-0.32		-0.39 – -0.28	
17 г. до н.э. – 2006 г. н.э.	-0.36	-0.27	-0.26	-0.30		
517–2006 гг.	-0.14	-0.08	-0.18		-0.28	+0.22
517–1900 гг.	-0.29	-0.22	-0.31		-0.39	+0.09

## 3.4 Обсуждение результатов

### 3.4.1 Преимущества метода DIRECT

Реконструкции на основе методов DIRECT и RCS сходны по воспроизведению низкочастотной изменчивости температуры за последние два тысячелетия. Обе реконструкции воспроизводят основные особенности изменений температуры за этот период. Это позволяет говорить о том, что метод DIRECT сохраняет низкочастотную информацию о палеоклимате, хотя абсолютные значения оцененной изменчивости и трендов для DIRECT ниже, чем для RCS. Одно заметное различие между двумя реконструкциями относится к СКА, а именно к периоду 10-11 веков н.э., когда реконструкция RCS показала значительно более высокие температуры (рис. 3.3Б). Интересно, что этот интервал совпал с периодом, в течение которого экспериментальные реконструкции, полученные с использованием искусственно уменьшенной репликации выборки, показали наибольший разброс (рис. ПЗ.4). Одной из причин указанных различий может быть подверженность метода RCS систематическим отклонениям вблизи начала и конца хронологии (раздел 1.3.3). Для метода DIRECT подобный эффект теоретически не должен наблюдаться, так как процесс удаления возрастного тренда в нем отсутствует.

Основным преимуществом метода DIRECT, использующего 3D поверхность отклика является то, что эта методология учитывает разницу в климатическом отклике деревьев разного возраста, а полученные зависимости сразу же используются для оценки климатических параметров. Зависимость реакции прироста на климат от возраста неоднократно наблюдалась для сосны обыкновенной в Скандинавии (Linderholm and Linderholm 2004), как и для других пород деревьев и регионов (например, (Carrer and Urbinati 2004; Copenheaver et al. 2011; Wu et al. 2013)). Молодые и старые деревья в этих случаях показывали разные паттерны климатического отклика. 3D-поверхность, полученная с использованием метода DIRECT, предоставляет средства для визуализации, количественной оценки и использования для реконструкции потенциально различного климатического отклика исследуемого параметра годовых колец. Эта возможность реализуется благодаря нелинейности 3D-поверхности, что позволяет описывать различные взаимосвязи климата и древесно-кольцевых параметров для разных биологических возрастов годовых колец. Подобное свойство невозможно у ДКХ, построенных при помощи классических методов стандартизации, поскольку кольца разных биологических

возрастов обычно усредняются за каждый год при построении обобщенной хронологии, которая затем используется для построения трансфер-функции.

### 3.4.2 Ограничения метода DIRECT

Ряд ограничений может повлиять на использование метода DIRECT. Во-первых, для построения 3D-поверхности требуется значительный объем данных за инструментальный период. Недостаток данных в течение инструментального периода неизбежно увеличит неопределенность модели. Общей чертой большинства наборов дендрохронологических данных, предназначенных для палеоклиматических исследований, является то, что инструментальный период преимущественно покрыт данными из биологически старых годовичных колец. Это происходит из-за широко используемой стратегии отбора образцов, при которой ищутся самые старые доминантные и субдоминантные деревья. Если инструментальный период короче биологического возраста всех использованных деревьев, часть плоскости [камбиальный возраст / древесно-кольцевой параметр], соответствующая годовичным кольцам малого камбиального возраста, не будет покрыта точками для построения 3D поверхности отклика. Однако это ограничение может быть преодолено на практике с помощью надлежащей стратегии отбора проб, то есть путем включения в общую выборку образцов из молодых живых деревьев.

Во-вторых, DIRECT преобразует значения параметров годовичных колец в климатическую реконструкцию с помощью статистической модели в 3D-пространстве [измерения годовичных колец | камбиальный возраст | климатические данные]. Для построения устойчивой модели необходимо, чтобы используемый параметр годовичных колец был тесно связан с реконструируемым климатическим фактором. Изменчивость максимальной плотности годовичных колец, использованной в данном исследовании, в значительной степени контролируется изменчивостью летних температур. Однако зависимость параметров годовичных колец от нескольких климатических факторов, скорее всего, ухудшило бы результаты анализа и сделало бы реконструкцию методом DIRECT невозможной.

Третье возможное ограничение методологии, описанной в этой главе, заключается в том, что реконструируемый климатический параметр должен быть определен заранее с использованием стандартных дендроклиматических методов (например, Biondi and Waikul

2004) до построения 3D-поверхности и до ее применения в целях реконструкции. Последние два перечисленных ограничения являются естественными ограничениями любой палеоклиматической реконструкции с использованием трансфер-функции, но они могут по-особенному проявляться в методе DIRECT, в котором трансфер-функция нелинейна и дополнительно зависит от камбиального возраста годовых колец.

В-четвертых, вычислительные затраты при использовании DIRECT весьма велики по сравнению с обычно применяемыми методами стандартизации. Наибольшие вычислительные затраты связаны с построением 3D-поверхности, подлежащей сглаживанию с помощью тонкопластинчатого сглаживающего сплайна. Эти затраты умножаются во много раз при использовании кросс-валидации и/или бутстреп-оценок, как это было сделано в данном исследовании.

В-пятых, при использовании DIRECT предполагается, что зависимость максимальной плотности годовых колец от возраста и температуры не изменялась в течение периода реконструкции (принцип униформизма), хотя это же предположение необходимо и при использовании других методов, в частности RCS.

### **3.4.3 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. Полученная реконструкция воспроизводит изменения летних температурных условий в течение последнего тысячелетия, соответствующие известным колебаниям температуры в Северном полушарии (Bradley and Jones 1993; Matthews and Briffa 2005; Mann et al. 2009; Graham et al. 2011; Goosse et al. 2012). Реконструкция на основе метода DIRECT показывает продолжительное похолодание во время МЛП и значительное потепление во время СКА. По сравнению с полным периодом реконструкции, 20-й век знаменует собой период теплых температур; однако реконструированные температуры СКА находятся на том же уровне, а большая продолжительность СКА не позволяет напрямую сравнивать его с потеплением 20-го века.

В масштабе столетия климатическое похолодание в течение МЛП было не таким сильным, как фаза похолодания в шестом и седьмом веках нашей эры, поскольку самый холодный столетний период, согласно полученной реконструкции, пришелся на 536–635 годы нашей эры. Разница с реконструкцией на основе RCS тут 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) Лето 536 г. н.э. было одним из самых холодных в исследуемом регионе за предыдущие 7,6 тыс. лет (Helama et al. 2013; Jones et al. 2013). Анализ нескольких ледниковых кернов выявил сигнал, который согласуется с вулканической гипотезой этого события (Larsen et al. 2008). Известно, что климатические последствия извержений вулканов могут сохраняться в течение как первого, так и второго года после извержения (Bradley 1988). Однако за этим чрезвычайно холодным годом последовало похолодание в масштабе столетия, которое представляет собой одну из наиболее заметных особенностей реконструкции (рис. 3.3Б). Долговременное похолодание МЛП также было описано как сдвиг климатического режима, вызванный повышенной вулканической активностью (Miller et al. 2012; Gennaretti et al. 2014). Эти выводы, которые были получены на основе косвенных данных о климате на основе годовичных колец и ледниковых кернов из Арктической Канады и Исландии, были подтверждены в ходе моделирования климата предыдущего тысячелетия, которое показало, что кратковременные извержения вулканов могут вызывать продолжительные изменения режима циркуляции океана в субполярной области и ослабление атлантической меридиональной опрокидывающей циркуляции (Schleussner and Feulner 2013) Эти изменения в климатической системе ожидаемо приводят к похолоданию и в исследуемом регионе, где изменчивость климата связана с естественной нестабильностью термохалинной циркуляции (Helama et al. 2009c). Таким образом, палеоклиматические данные, полученные на основе метода DIRECT могут указывать на возможность спровоцированного вулканическими извержениями наступления значительного снижения летней температуры в северной Европе в течение шестого и седьмого веков нашей эры, что аналогично ранее описанным механизмам изменения в климатической системе во время МЛП.

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). Эта тенденция может быть связана с теорией орбитального воздействия Миланковича, согласно которой должно наблюдаться снижение летней инсоляции в этих регионах в течение нынешнего межледникового (Berger 1978, 1988). Ранее орбитальное воздействие и последующее снижение летней инсоляции связывалось с находками макро- и мегафоссилий, свидетельствующими об отступлении границы леса на юг в Фенноскандии в течение голоцена (Kullman 1992; Payette et al. 2002; Helama et al. 2004a). Преимущество древесно-кольцевых данных для отслеживания этой тенденции заключается в том, что ее интенсивность можно определить для любого диапазона календарных лет. Хотя реконструкция на основе DIRECT в целом соответствует гипотезам об орбитальном воздействии, а также предыдущим оценкам, основанным на MXD (Esper et al. 2012b), и демонстрирует тенденцию снижения температуры за различные интервалы в течение последних 1500-2000 лет, расхождение между реконструкциями на основе DIRECT и RCS (таблица 3.2), а также предыдущими исследованиями того же набора данных (Esper et al. 2014), как и его частей на основе методики RCS (Esper et al. 2012b; Melvin et al. 2013), было неизбежно. В том числе возникают следующие вопросы: почему RCS-хронология, основанная на наборе данных из Торнетреска (северная Швеция) демонстрирует положительную тенденцию за последние 1500 лет (табл. 3.2)? Является ли отрицательная долгосрочная тенденция, оцененная на базе набора данных MXD из северной Финляндии, объективным климатическим сигналом?

В предыдущих исследованиях одной из возможных причин обнаружения тысячелетнего отрицательного тренда в данных из северной Финляндии была названа высокая репликация образцов (Esper et al. 2012b). Однако проведенный бутстреп-анализ реконструкции на основе DIRECT не подтверждает эту гипотезу, поскольку искусственное сокращение объема выборки не привело к исчезновению отрицательного тренда (рис. П3.5). Предыдущие исследования также указывали (Esper et al. 2014) на общую положительную и неклиматическую долгосрочную тенденцию в хронологии MXD из-за естественного процесса разложения погребенной древесины, поскольку более древние образцы кажутся легче, чем более молодые. В разрез с этой гипотезой можно предположить, что подобное уменьшение веса (и плотности) образцов является результатом растворения неструктурных

и вторичных компонентов древесины в воде (HILLIS 1985), и что фактический погребенный материал изначально более плотной древесины может сохраняться дольше, чем погребенная древесина меньшей плотности и долговечности. Следовательно, отрицательная долгосрочная тенденция в плотности древесины может быть связана с лучшей долговременной сохранностью исходно более плотных образцов. Ранее также сравнивались метаданные шведских и финских материалов MXD (Esper et al. 2012b; Melvin et al. 2013), что позволило сделать вывод о том, что одно из основных различий между этими массивами образцов связано с биогеографическими аспектами (Matskovsky and Helama 2014). Финский материал происходит с нескольких участков бореальных лесов в южной и центральной Лапландии, в то время как шведский материал происходит с северной границы леса. Вопрос о том, влияют ли биогеографические факторы на тысячелетние тенденции в хронологиях и соответствующих им реконструкциях, и ведут ли себя данные о максимальной плотности годовых колец из бореальных лесов по-другому по сравнению с данными с северной границы леса в соответствующих временных масштабах, остается неопределенным.

### **3.5 Выводы к главе 3**

1) Представлена методика реконструкции климатических параметров по древесно-кольцевым данным, не использующая процесс стандартизации, а именно исключения возрастного тренда из серий измерений параметров годовых колец.

2) В представленном методе, названном DIRECT, объединены процессы учета камбиального возраста годовых колец (что избавляет от необходимости исключения возрастного тренда) и построения трансфер-функции для преобразования параметров годовых колец в оценки климатического параметра.

3) В методе DIRECT трансфер-функция в виде 3D-поверхности отклика преобразует параметры годовых колец в оценки климатического параметра, учитывая не только камбиальный возраст годовых колец, но и любые потенциальные изменения климатического отклика в зависимости от возраста деревьев. Кроме того, 3D-поверхность не имеет ограничений на линейность.

4) Одним из преимуществ метода DIRECT является то, что не приходится усреднять значения параметров годовых колец за каждый год для колец разного камбиального возраста до построения трансфер-функции.



5) Показано, что в реконструкции на основе метода DIRECT присутствует долгопериодная изменчивость, сопоставимая по крайней мере с долгопериодной изменчивостью в реконструкциях на базе метода RCS, хотя абсолютные значения реконструированных изменений температуры для метода DIRECT несколько ниже.

6) 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.

7) Показано наличие значимого отрицательного тренда летних температур северной Фенноскандии со скоростью  $-0.27$  °C в тысячу лет за период 17 г. до н.э. – 2006 г. н.э.

8) Показано, что долгопериодная изменчивость в древесно-кольцевых данных может иметь своим источником не только и не столько сами значения прироста, сколько распределение во времени количества быстро и медленно растущих деревьев (или с более и менее плотной древесиной). Этот вывод может свидетельствовать о том, что древесно-кольцевые данные способны сохранять долгопериодную климатическую изменчивость даже при наличии эффекта дивергенции, то есть нелинейного (ослабевающего) отклика при некоторых значениях климатического параметра.

## 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 данной главе 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.

### 4.1 Введение

Известно, что некоторая часть изменчивости, идентифицированной в годичных кольцах деревьев, относительно постоянна во времени и часто связывается с влиянием различных физических источников (например, доминирующие периоды в рядах  $\Delta^{14}\text{C}$  примерно 208, 89, 22 и 11 лет, связанные с изменениями солнечной активности, (Ogurtsov et al. 2002; Damon and Peristykh 2005)). Однако, помимо орбитальных и глобальных космогенных факторов как модуляторов изменчивости климата, в древесно-кольцевых хронологиях обнаруживаются и другие периодические сигналы, явно связанные с биотическими факторами. Например, регулярные колебания популяции чешуекрылых, питающихся листвой, являются причиной значительных угнетений прироста деревьев в европейских Альпах с устойчивой периодичностью около 8–9 лет (Baltensweiler and Rubli 1999; Esper et al. 2007; Büntgen et al. 2009). Сообщалось, что влияние этого популяционного цикла на лесную экосистему приводило к уменьшению прироста деревьев, а также к анатомическим изменениям в затронутых годичных кольцах, по крайней мере на протяжении последнего тысячелетия, несмотря на значительные колебания региональной температуры (теплые условия в средневековье и более холодные условия в течение малого ледникового периода, Esper et al. 2007).

Устойчивые циклы прироста деревьев *Nothofagus pumilio* были зарегистрированы в южной Патагонии, с заметными пиками в высокочастотной части спектра. Отчетливый

сигнал с периодом около семи лет у *N. pumilio* также был отмечен у деревьев архипелага Огненная Земля (Aravena et al. 2002; Massaccesi et al. 2008). Этот сигнал, занимающий до 39% в общей изменчивости ДКХ живых деревьев, также был отмечен и в хронологиях погребенной древесины для разных периодов, самый ранний из которых – 600-750 гг. н.э. (Roig et al. 1996). Это может означать, что выделенный цикл стабилен во времени, по крайней мере, в течение последних 1400 лет. Семилетняя цикличность была также обнаружена в ДКХ живых деревьев *N. pumilio* в центральном секторе Огненной Земли и в Магеллановом регионе между Пунта-Аренас и Торрес-дель-Пайне. Однако мне не известны какие-либо сообщения о его наличии в хронологиях *N. pumilio*, расположенных к северу от этого региона как в аргентинском, так и в чилийском ареале этой породы. Х.-К. Аравена и соавторы (Aravena et al. 2002) утверждали, что эта периодичность может быть связана с местными условиями или биологическими взаимодействиями, которые еще четко не объяснены, указывая на свидетельства о вспышках популяции насекомых видов *Ormiscodes* и *Chilecomadia* в лесах *N. pumilio* в северной части аргентинской Патагонии, а также мотыльков семейства *Geometrida*, которые могли быть причиной дефолиации *N. pumilio* в районе Пунта-Аренас (Veblen et al. 1996). Вспышки насекомых-вредителей могут носить устойчиво периодический характер (Lynch 2012). Напротив, (Massaccesi et al. 2008) утверждают, что семеношение может быть ключевым фактором, подавляющим рост деревьев каждые 6-8 лет, поскольку существует известный компромисс между потреблением биоассимилятов на семена и на прирост годичных колец как у хвойных (Koenig and Knops 1998), так и у лиственных деревьев (например, Speer 2001; Drobyshev et al. 2010). В данной главе проверяются обе эти гипотезы на деревьях, которые были поражены дефолирующими насекомыми, а также на деревьях, за которыми велись наблюдения продуктивности семеношения.

Несмотря на описанную ярко выраженную изменчивость предположительно неклиматического происхождения, хронологии *N. pumilio* с Огненной Земли использовались для получения климатических реконструкций (Boninsegna et al. 1989; Villalba et al. 1997b; Aravena et al. 2002), что подтверждает наличие достаточно сильных климатических сигналов в этих хронологиях. В некоторых случаях эти хронологии намеренно исключались из дендроклиматических исследований, чтобы избежать введения неклиматического сигнала в реконструкции (Р. Вийяльба; М. Моралес, личные сообщения). В данной главе предлагается метод удаления устойчивой циклической неклиматической

изменчивости из хронологий годовых колец, направленный на усиление их климатического отклика. Подход основан на методике сингулярного спектрального анализа (SSA) и состоит в удалении из хронологий периодического сигнала, выделенного на основе первых собственных векторов SSA.

## 4.2 Материалы и методы

### 4.2.1 Древесно-кольцевые хронологии

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 (таблица 4.1). Девять хронологий (ABL, BRI, CUC, ECC, HEW, PG, VAN, VALN, YEN) были обновлены до 2016 г. с помощью данных, собранных во время полевых работ в октябре 2017 г. и в марте 2018 г. (таблица 4.1). Новые образцы были приклеены к деревянным подложкам, отшлифованы, отсканированы и измерены в программе CooRecorder 9.0 (<http://www.cybis.se>). Там, где на сканированном изображении не было видно годовых колец, их измерение проводилось на приборе Velmet с точностью до 0,001 мм. Визуальное перекрестное датирование и качество измерений проверялось с помощью программы COFESHA (Grissino-Mayer 2001). Все измерения предыдущих сборов также были проверены в программе COFESHA. Для каждой пробной площади все серии, прошедшие перекрестное датирование, были стандартизированы с использованием программы ARSTAN (Cook 1985; Cook and Holmes 1999). Возрастной тренд был удалён посредством визуально контролируемой аппроксимации функциями различной формы: функции Хугерсхоффа, отрицательной экспоненты, линейной функции с отрицательным или нулевым наклоном. Индексы вычислялись как отношения между исходными измерениями и значениями аппроксимирующих их функций. Затем для каждого календарного года вычислялось среднее значение с использованием робастной двухвесовой оценки. Стабилизация дисперсии не использовалась. Чтобы оценить общий региональный характер прироста деревьев, все 1605 рядов были усреднены в региональную мастер-хронологию, названную TDF (от Tierra del Fuego, Огненная Земля), также с помощью программы ARSTAN.

#### 4.2.2 Климатические данные

Климатические данные из архива CRU TS 4.00 (Harris et al. 2014) были извлечены и усреднены для десяти узлов сетки, охватывающих исследуемую территорию ( $68,75^{\circ}$  –  $66,75^{\circ}$  з.д.,  $54,25^{\circ}$  –  $54,75^{\circ}$  ю.ш.). Использовались данные только с 1931 г., поскольку это год начала самого продолжительного ряда инструментальных температур в исследуемой части острова (метеостанция Ушуайя). Ежемесячные оценки средних (TMP), максимальных (TMX) и минимальных (TMN) температур, осадков (PRE), суточных температурных диапазонов (DTR), облачности (CLD) и частоты морозных дней (FRS) использовались для сравнения с данными ширины годичных колец.

#### 4.2.3 Процедура удаления периодического сигнала

Была использована следующая процедура для удаления квази-семилетней периодической компоненты, предположительно связанной с неклиматическим сигналом в хронологиях:

1) Метод SSA был применен к каждой хронологии, и первые собственные векторы, выбирающие более 3% общей дисперсии, были проверены на наличие квази-семилетнего цикла (рис. 4.1 Б). Для большинства хронологий 7-летний сигнал был обнаружен в первых двух собственных векторах, то есть в собственных векторах, отвечающих за наибольшее количество объясненной дисперсии. Во многих случаях 7-летнюю периодичность содержали и собственные векторы более высокого порядка (таблица 4.1).

2) Собственные векторы, содержащие 7-летнюю периодичность, суммируются (рис. 4.1 В) и вычитаются из исходной хронологии (рис. 4.1 Г). Хронология с удаленной 7-летней периодичностью называется «скорректированной» хронологией. Коррекция цикличности подтверждается сравнением спектров исходной и скорректированной хронологий (рис. 4.1 Д). Для каждой хронологии количество собственных векторов, содержащих 7-летнюю изменчивость, и общее количество выбираемой ими дисперсии указано в таблице 4.1. В 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. 4.1 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.

Таблица 4.1.

Набор древесно-кольцевых хронологий деревьев *Nothofagus pumilio* для Огненной Земли.

№	Код площади	Название площади	Широта	Долгота	Высота, м н.у.м.	Число серий	Первый год	Послед- ний год	Ориен- тация склона	Корре- ляция с PC1☒	Порядок собствен- ных векторов с ~7- летней циклич- ностью	% дисперсии в 7- летних компонен- тах
1	ABL*	Aguas Blancas	-54.6148	-67.0914	520	73	1801	2016	N-NW	0.58	3 4 5	21.2
2	BOQ	Ea. Boquerón	-54.3333	-68.1667	450	51	1675	1999	-	0.66	2 3	15.8
3	BRI*	Sierra Bridges	-54.7328	-67.8109	500	81	1675	2016	SW	0.81	3 4	10.1
4	BRO	Bronsovich	-54.6014	-66.5149	199	26	1715	2005	-	0.68	1 2	21.8
5	CAR	Valle Carbajal	-54.7259	-68.2102	250	42	1683	1994	NE	0.71	1 2	32.0
6	COR	Co. Cornu	-54.7706	-67.5914	500	40	1720	2003	S-SW	0.81	4 5	14.2
7	CUC*	Co. Cuchillo	-54.8010	-67.6109	500	81	1700	2016	-	0.82	2 3	22.8
8	ECC*†	Ea. Carmen	-54.3700	-67.8749	250	95	1726	2016	-	0.45	1 2	13.6
9	ELC	Ea. La Correntina	-54.5500	-67.0000	300	16	1684	1998	-	0.56	2 3	18.8
10	EMC†	Ea. M. Cristina	-54.3828	-67.2486	300	29	1743	1986	-	0.51	1 2	12.9
11	ESJ†	Ea. San Justo	-54.0500	-68.5667	250	65	1723	1985	-	0.52	1 2	14.1
12	GM1	Le Martial 150-250	-54.8016	-68.3674	200	16	1705	1995	-	0.72	1 2 3	35.2
13	GM2	Le Martial 300-400	-54.8016	-68.3674	350	13	1648	1995	-	0.52	6	2.7

№	Код площади	Название площади	Широта	Долгота	Высота, м н.у.м.	Число серий	Первый год	Послед- ний год	Ориен- тация склона	Корре- ляция с РС1*	Порядок собствен- ных векторов с ~7- летней циклич- ностью	% дисперсии в 7- летних компонен- тах
14	GM3	Le Martial 450-500	-54.7963	-68.3835	475	15	1695	1995	N	0.80	1 2	19.1
15	GM†	Le Martial	-54.8016	-68.3674	300	44	1648	1995	-	0.82	3 4	18.4
16	GUA	Co. Guanaco	-54.8178	-68.5533	450	25	1770	2002	W	0.65	1 2	19.3
17	H19	Hito XIX	-54.1333	-68.6000	350	43	1659	1999	E	0.58	4 5 6	8.7
18	HAR†	Ea. Harberton Co.	-54.8706	-67.3321	30	23	1736	1985	-	0.69	1 2	34.6
19	HEW*	Hewhuepen Krund Southern	-54.5914	-67.2366	600	113	1709	2016	SW	0.77	3 4	16.7
20	KRS	slope Krund Northern	-54.7199	-68.0034	330	123	1700	2002	S	0.87	2 3	25.5
21	KRN	slope	-54.7199	-68.0034	330	111	1725	2002	N	0.85	1 2	27.4
22	KRU	Krund	-54.7199	-68.0034	460	24	1726	1997	S	0.76	5 6	10.9
23	KR1	Krund N220 (KR1)	-54.7231	-68.0150	210	31	1792	2002	N	0.51	1 2	26.0
24	KR2	Krund N330 (KR2)	-54.7222	-68.0109	330	29	1725	2002	N	0.75	1 2	27.2
25	KR3	Krund N460 (KR3)	-54.7344	-68.0188	460	25	1744	2002	N	0.70	3 4	12.9
26	KR4	Krund N550 (KR4)	-54.7358	-68.0181	550	26	1769	2002	N	0.58	3 4 6	17.5



№	Код площади	Название площади	Широта	Долгота	Высота, м н.у.м.	Число серий	Первый год	Послед- ний год	Ориен- тация склона	Корре- ляция с PC1☒	Порядок собствен- ных векторов с ~7- летней циклич- ностью	% дисперсии в 7- летних компонен- тах
27	KR5	Krund S220 (KR5)	-54.7231	-68.0150	220	28	1773	2002	S	0.69	1 2	37.3
28	KR6	Krund S330 (KR6)	-54.7222	-68.0109	330	29	1700	2002	S	0.77	1 2	24.6
29	KR7	Krund S460 (KR7)	-54.7199	-68.0034	460	32	1712	2002	S	0.73	5 6	11.3
30	KR8	Krund S550 (KR8)	-54.7175	-67.9915	550	34	1803	2002	S	0.61	4 5	9.7
31	LE2†	Lago Escondido 2	-54.6464	-67.8219	550	13	1704	1998	NW	0.75	2 3	15.5
32	LP3	LP3	-54.5254	-66.8127	248	21	1731	2005	-	0.59	2 3	17.3
33	MBR	Mte. Brown	-54.8579	-67.5944	430	34	1710	2003	-	0.76	1 2	27.4
34	MIC†	Microondas	-54.6556	-67.7971	700	20	1664	1984	-	0.34	-	0.0
35	NOT	Co. No Top Co.	-54.8807	-67.1615	450	49	1704	2003	S	0.83	1 2	20.8
36	OBS	Observación	-54.6295	-67.0280	500	40	1691	2003	SW	0.64	6	5.2
37	PAR	Parcela 139 Paso	-54.6037	-66.5483	255	14	1732	2005	-	0.63	1 2	25.8
38	PG*†	Garibaldi II	-54.6888	-67.8423	500	56	1740	2016	W	0.69	3 4	14.8
39	RCL†	Río Claro Valle Andorra	-54.4714	-67.7614	150	32	1739	1986	-	0.31	2 3 6	18.4
40	VAH*	(High)	-54.7399	-68.3704	500	63	1782	2016	S	0.66	5 6	11.2

№	Код площади	Название площади	Широта	Долгота	Высота, м н.у.м.	Число серий	Первый год	Последний год	Ориентация склона	Корреляция с PC1☒	Порядок собственных векторов с ~7-летней цикличностью	% дисперсии в 7-летних компонентах
41	VAL†	Valle Andorra(Low)	-54.7500	-68.3398	250	32	1594	1985	-	0.20	-	0.0
42	VALN*	Valle Andorra2 (Low)	-54.7500	-68.3398	250	42	1803	2016	SW	0.60	1 2	39.2
43	YEH†	Lago Yehuin	-54.4720	-67.7184	200	25	1731	1986	-	0.39	-	0.0
44	YEN*	Co. Yenosh	-54.3863	-67.6971	450	59	1734	2016	SE	0.58	4 5 6	11.6

† хронологии доступны в ITRDB

\* хронологии обновлены до годового кольца 2016 года

☒ Соотношение каждой хронологии с их первой главной компонентой (PC1) для общего периода 1803-1984 гг. PC1 объясняет 44% общей дисперсии.

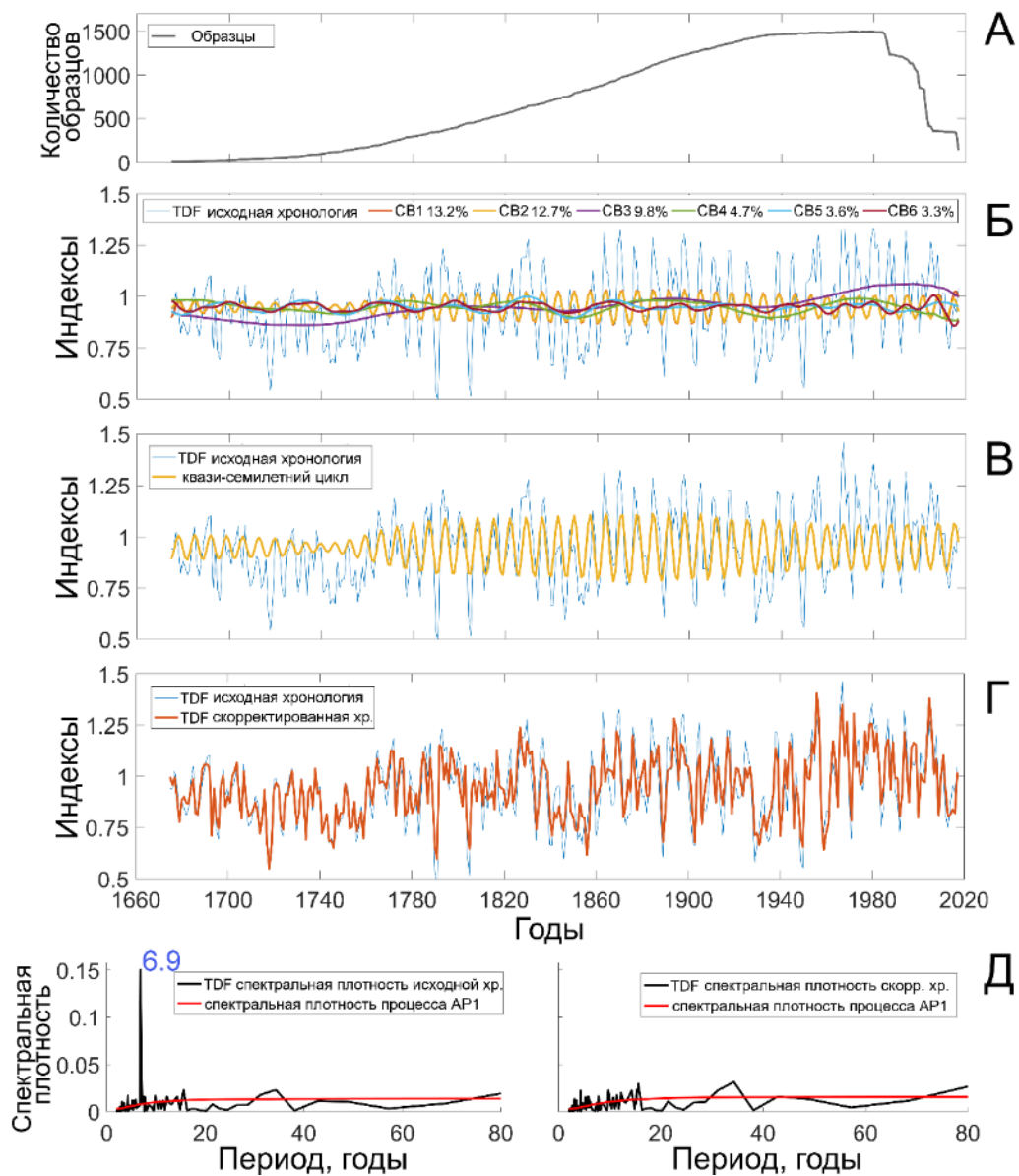


Рисунок 4.1 – А – Глубина выборки хронологии TDF, состоящей из всех 1605 серий измерений. Хронология ограничена 1675 годом, где имеется только 10 образцов. Б – Исходная хронология TDF и ее первые шесть собственных векторов (CB), полученных на основе SSA. Показан соответствующий процент объясненной дисперсии для каждого CB. В – Сумма квази-семилетних первого и второго CB, 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.

#### 4.2.4 Анализ климатического отклика и его стабильности

Климатический отклик рассчитывался как коэффициенты корреляции Пирсона для общего периода каждой хронологии и инструментальных данных, охватывающих 1931-2015 годы, с января календарного года, соответствующего началу вегетационного периода на Огненной Земле (примерно в ноябре) по апрель следующего года (год окончания вегетационного периода). Следуя правилу Шульмана (Schulman, 1956), календарный год годовичного кольца в Южном полушарии соответствует году начала вегетационного периода. Для оценки стабильности отклика климата во времени также были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона в скользящем 30-летнем окне. Значимость коэффициентов корреляции тестировалась на уровне  $\alpha=0,05$ .

#### 4.2.5 Моделирование прироста на основе VS-Lite

Модель VS-Lite версии 2.3 с байесовской схемой оценки параметров (Tolwinski-Ward et al. 2011, 2013) использовалась для моделирования прироста деревьев на основе ежемесячных данных о температуре и осадках. Продолжительность вегетационного периода была задана с октября по апрель, включая весну, лето и осень Южного полушария. Все остальные параметры модели VS-Lite были установлены по умолчанию. Для калибровочных и верификационных экспериментов параметры модели были сначала оценены для периода калибровки 1931–1973 гг., а затем с этими параметрами модель была применена к периоду верификации (1974–2015 гг.). После этого периоды калибровки и верификации менялись местами. Для итогового моделирования параметры были оценены с использованием полного периода 1931–2015 гг., и с этими параметрами модель была применена для воспроизведения прироста деревьев в течение всего инструментального периода.

#### 4.2.7 Измерение семеношения

На пробной площади ЕСС (табл. 4.1), расположенной в нетронutom лесу, производились замеры семенной продуктивности в период 2006–2018 гг. Семена ежегодно подсчитывали в 18 случайно расположенных на лесной подстилке квадратных лотках площадью  $0,5 \text{ м}^2$ , а объем годовой семенной продукции усредняли и переводили в значения млн/га. В начале марта 2018 г. (конец вегетационного периода) были отобраны образцы из 24 деревьев с этого же участка, по два керна с каждого дерева. Средняя ширина годичных

колец сравнивалась с временными рядами семенной продуктивности. Необработанные значения ширины годичных колец деревьев для каждого года сравнивались на предмет возможных различий в средних значениях с использованием t-критерия Стьюдента.

## **4.3 Результаты**

### **4.2.6 Реакция прироста на дефолиацию**

В лесу были отмечены деревья, как пострадавшие, так и не затронутые дефолиацией из-за насекомых, произошедшей летом 2009–2010 гг. Пораженные деревья были частично или полностью дефолированы. В конце вегетационного периода 2011/12 г. (апрель 2012 г.) было проведено бурение 16 деревьев каждой группы, по два керна с каждого дерева. Возрастное распределение двух выбранных групп деревьев не отличалось (критерий Уилкоксона не опровергает гипотезу о равных медианах возраста деревьев для двух групп,  $\alpha = 0,66$ ), что позволило работать с исходными измерениями ширины колец и избежать индексирования. Чтобы оценить статистическую значимость различий между выборками, измерения по двум радиусам для каждого дерева усреднялись, а нормальность исходного распределения ширины колец проверялась для каждого года с использованием теста Лиллиефорса (по 16 значений в каждый год). Поскольку для всех протестированных образцов данный критерий не смог отклонить нулевую гипотезу о нормальности распределения, впоследствии был применен t-критерий Стьюдента для проверки разницы средних значений ширины годичных колец между двумя группами.

### **4.3.1 Климатический отклик исходных и скорректированных хронологий**

Несмотря на некоторые различия в климатическом отклике анализируемых хронологий, связанные с разными локальными условиями обитания деревьев, у них есть и много общих черт. Они особенно очевидны при сравнении паттернов отклика отдельных хронологий с паттерном отклика первой главной компоненты (ГК1) всех хронологий и паттерном отклика региональной хронологии TDF. Но хронология ГК1 ограничена общим периодом всех хронологий и заканчивается 1984 годом, тогда как хронология TDF охватывает максимально возможный период. Следовательно, наибольший интерес представляют результаты климатического отклика хронологии TDF (рис. 4.2), в котором проявляются общие черты отклика всего набора древесно-кольцевых хронологий.

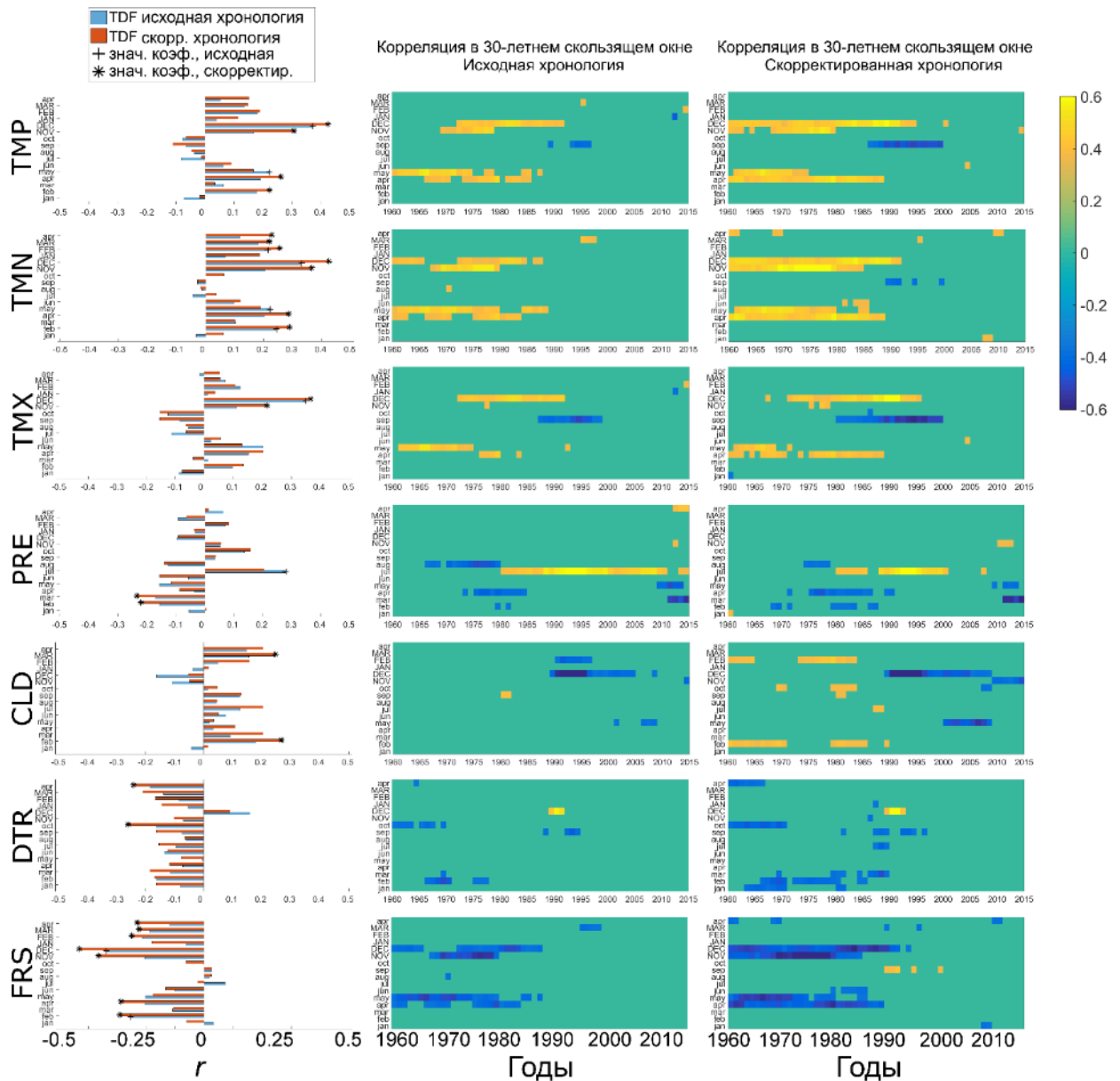


Рисунок 4.2 – Левая колонка: климатический отклик, рассчитанный в виде коэффициентов корреляции ( $r$ ) для исходной (синий) и скорректированной (оранжевый) хронологии TDF за период 1931–2015 гг. Значимые коэффициенты ( $\alpha=0,05$ ) отмечены плюсами и звездочками. Средняя колонка: климатическая реакция исходной хронологии TDF в 30-летнем скользящем окне. Год на оси  $x$  соответствует последнему году окна. Цветом показаны только статистически значимые коэффициенты (цветной масштаб справа). Правая колонка: то же, что и средняя колонка, но для скорректированной хронологии TDF. Сверху вниз: TMP (средняя температура), TMN (минимальная температура), TMX (максимальная температура), PRE (осадки), CLD (облачность), DTR (суточный диапазон температур), FRS (частота морозных дней). Месяцы вегетационного периода (с ноября по март) обозначены прописными буквами.

Хронология TDF показывает наибольшую реакцию на ежемесячную минимальную и среднюю температуру (положительный отклик) и частоту заморозков (отрицательный отклик) текущего и предыдущего вегетационного периодов. Однако во второй половине анализируемого периода отклик меняется, что видно из графиков корреляции в скользящем окне в центральном и левом столбцах рис. 4.2.

Скорректированная хронология TDF в целом 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.

#### **4.3.2 Моделирование прироста на основе VS-Lite**

В этом разделе представлены результаты моделирования прироста деревьев с помощью модели VS-Lite на основе ежемесячных данных о температуре и осадках. Из сравнения модельных и реальных древесно-кольцевых хронологий видно, что коэффициенты корреляции между ними стабильно выше для скорректированной хронологии, чем для исходной (табл. 4.2). Качество моделирования меньше зависит от периода калибровки, чем от периода применения модели. Наблюдается очевидное снижение качества моделирования во второй половине инструментального периода, независимо от периода калибровки, на котором были настроены параметры модели.

Таблица 4.2.

Коэффициенты корреляции реальных и модельных хронологий ширины годичных колец. Результаты калибровки и верификации показаны для исходных и скорректированных хронологий TDF. Результаты в последнем столбце соответствуют рисункам 4.3А и 4.3Б. Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты на уровне  $\alpha=0,05$ .

	<i>Калибровка</i> <i>1931-1973</i>	<i>Верификация</i> <i>1974-2015</i>	<i>Калибровка</i> <i>1974-2015</i>	<i>Верификация</i> <i>1931-1973</i>	<i>Калибровка</i> <i>1931-2015</i>
<i>TDF исходная</i>	<b>0.3498</b>	0.2563	0.2590	<b>0.3489</b>	<b>0.3334</b>
<i>TDF скорректированная</i>	<b>0.4668</b>	<b>0.3651</b>	<b>0.3570</b>	<b>0.4876</b>	<b>0.4478</b>

Модель VS-Lite использовалась для воспроизведения исходной и скорректированной хронологий TDF (рис. 4.3А, Б). 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). Даже после корректировки хронологии TDF все еще есть некоторые несоответствия между наблюдаемым (более низкие значения) и модельными (более высокие значения) значениями прироста деревьев, например, в 1940, 1949–50, 1959, 1984, 1992–93 гг. (рис. 4.3А Б). Эти несоответствия могут представлять собой последствия циклических уменьшений прироста, которые не были полностью устранены процедурой корректировки. Однако различия между наблюдаемым и модельным ростом деревьев меньше для скорректированной хронологии, что подтверждается повышением коэффициентов корреляции. Таким образом, даже при наличии некоторых следов, по-видимому, неклиматической природы, скорректированная хронология имеет преимущество над исходной с точки зрения содержания климатического сигнала. Усиление климатического сигнала также подтверждается аналогичным улучшением качества моделирования для всех 44 хронологий набора (рис. 4.3 В).



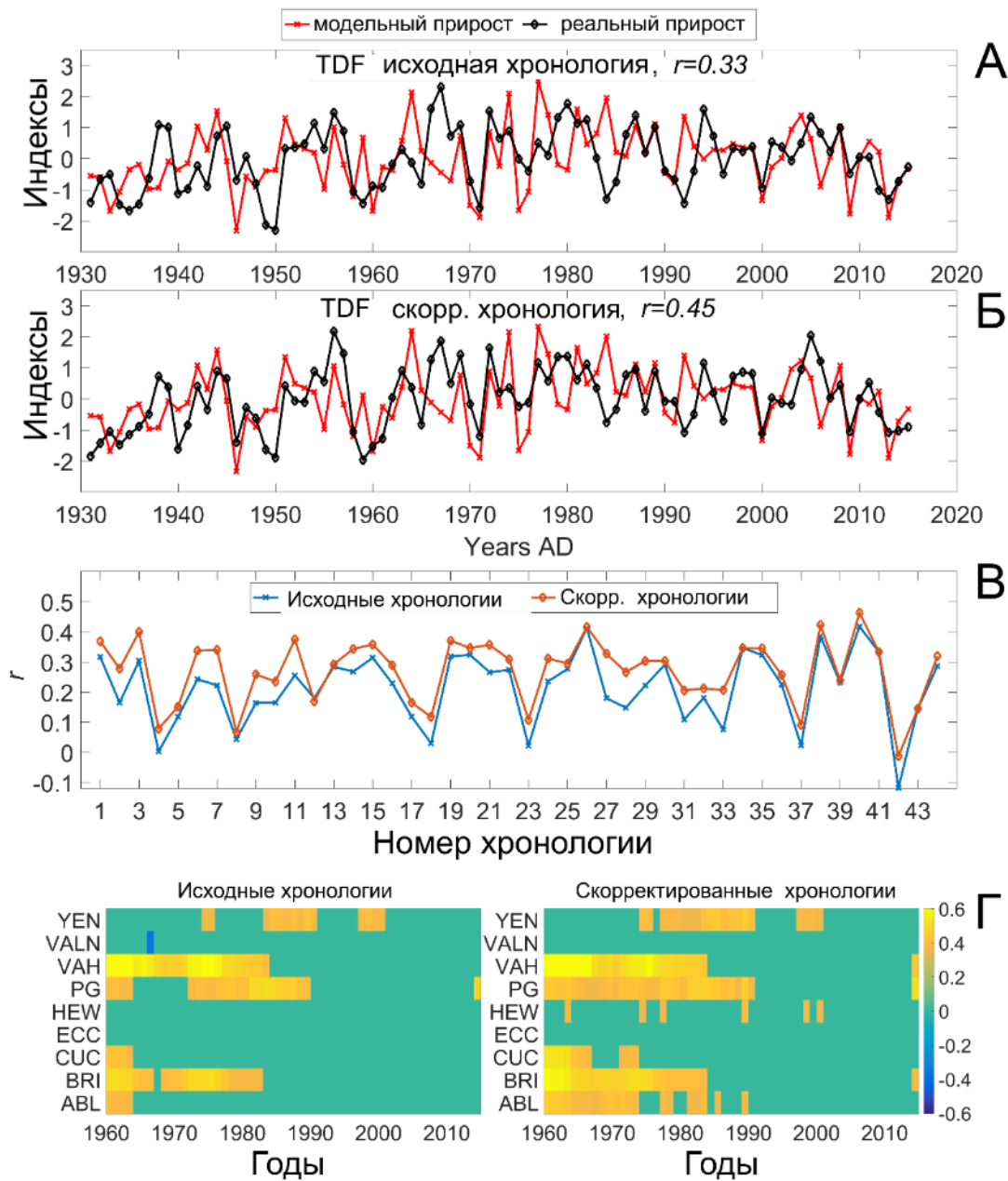


Рисунок 4.3 – Модельный (на основе VS-Lite, красный) и наблюдаемый (черный) прирост деревьев для исходной (А) и скорректированной (Б) хронологии TDF. Калибровка выполнена на периоде 1931–2015 гг. (табл. 4.2, последний столбец). В – Коэффициенты корреляции  $r$  модельного и наблюдаемого прироста деревьев для всех 44 пар исходных (синие) и скорректированных (оранжевые) хронологий. Числа на оси  $x$  соответствуют последовательному положению древесно-кольцевых хронологий в таблице 4.1. Г – Корреляция в скользящем 30-летнем окне между модельным и наблюдаемым приростом деревьев для девяти хронологий, заканчивающихся в 2016 г. Результаты для исходных хронологий показаны слева, а для скорректированных - справа. Год на оси  $x$  соответствует последнему году окна. Цветом показаны только значимые коэффициенты корреляции (цветной масштаб справа).

Скорректированные хронологии имеют статистически значимо более высокие коэффициенты корреляции с результатами модельного прироста на основе VS-Lite, чем исходные хронологии (критерий Стьюдента для связанных выборок, значимость на уровне  $\alpha < 0,001$ ). Все же необходимо упомянуть, что нельзя считать модельную хронологию на основе VS-Lite идеальным представлением того, как на самом деле должен выглядеть прирост, не подверженный влиянию неклиматических факторов, так как использованная модель является сильно упрощенным представлением процессов реального мира.

Сравнение наблюдаемого и модельного прироста деревьев с помощью корреляции в скользящем окне (рис. 4.3 Г), а также результаты калибровки и валидации для первой и второй половины инструментального периода (1931–2015 гг. н.э.) подтверждают лучшую способность модели воспроизводить прирост деревьев в течение первой половины инструментального периода, независимо от того, какой калибровочный период использовался для настройки модели. Вместе с результатами по устойчивости климатического отклика это указывает на меньшее содержание климатической информации в хронологиях после 1980-х гг. Другим объяснением снижения корреляции может являться то, что другие климатические факторы, помимо температуры и осадков текущего вегетационного периода, в последние десятилетия стали играть более важную роль.

#### **4.3.3 Непосредственное наблюдение за деревьями после дефолиации и за семеношением**

Было проведено сравнение рядов продукции семян и изменений ширины годичных колец для участка ЕСС, где имеются наблюдения за семеношением на протяжении 13 лет (рис. 4.4). Для этого участка нет данных о какой-либо зависимости прироста деревьев от семенной продуктивности. Статистический тест подтверждает отсутствие значимого уменьшения ширины колец в 2011 г. после высокой продукции семян, а также в последующие годы 2012–2014 гг. (t-критерий Стьюдента на уровне  $\alpha = 0,05$ ). Эти результаты не исключают возможности того, что на рост деревьев *N. pumilio* влияет семеношение, однако для изучаемого участка и рассматриваемого периода наблюдений статистически значимых закономерностей найдено не было.

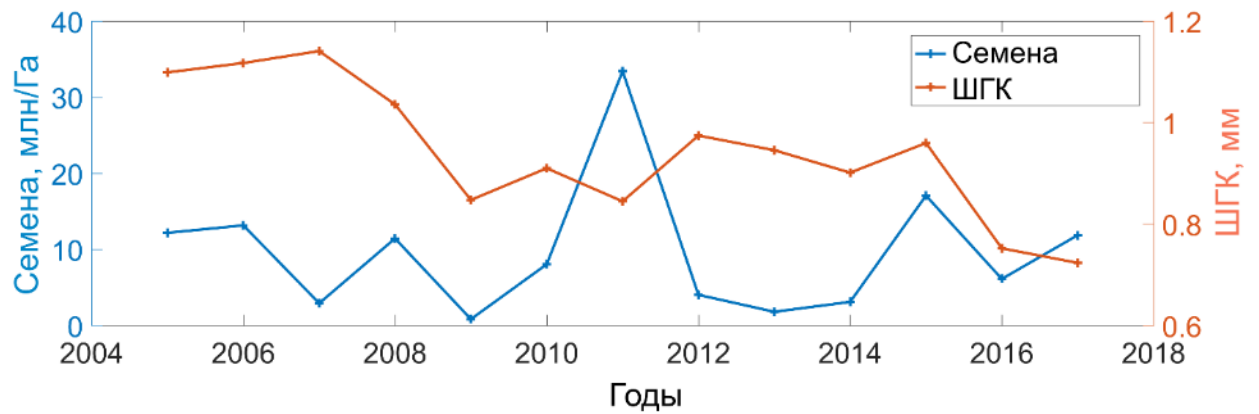


Рисунок 4.4 – Ряды продукции семян и средней ширины годичных колец (ШГК) на участке ЕСС.

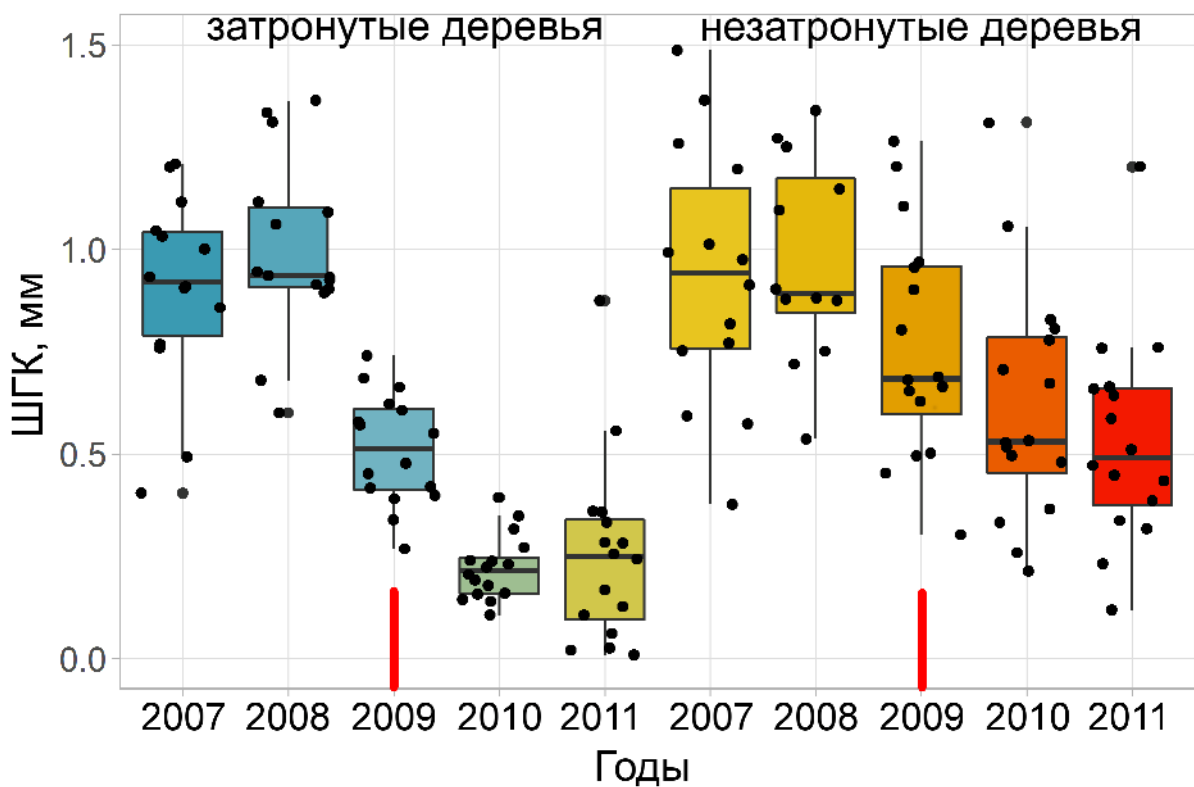


Рисунок 4.5 – Диаграммы ширины годичных колец деревьев, пораженных (левая половина) и не затронутых (правая половина) вспышкой насекомых летом 2009–2010 гг. (год вспышки отмечен вертикальными красными столбиками).

Косвенным свидетельством о маловероятности происхождения 7-летней периодичности из-за событий семеношения являются наблюдения за продукцией семян на участке ESJ, которые охватывает период 2002–2018 гг. (к сожалению, данные о ширине годовых колец за этот период на участке ESJ отсутствуют). Наблюдения о продукции семян на участке ESJ показали, что наибольшая продукция относится к 2007 г., в отличие от участка ECC (2012 г.), а два ряда наблюдений за семеношением не имеют значимой корреляции ( $r = 0,11$ ). При этом все самые высокие угнетения прироста синхронны по всей исследуемой территории, что подтверждается высокой корреляцией между хронологиями.

Также было проведено сравнение прироста деревьев, пострадавших от дефолиации насекомыми-вредителями в 2009 г. (декабрь 2009 г.), и контрольных деревьев, не пострадавших от дефолиации. Результаты показывают (рис. 4.5), что в 2007 и 2008 годах (до дефолиации) ширина годовых колец пораженных и непораженных деревьев статистически значимо не различалась ( $\alpha=0,939$  и  $\alpha=0,332$  соответственно). Однако для года вспышки вредителей (2009 г.) и последующих лет (2010 и 2011 гг.) разница высоко статистически значима ( $\alpha = 0,0025$ ,  $\alpha < 0,0001$  и  $\alpha = 0,0027$ , соответственно). Эти результаты соответствуют результатам (Piper et al. 2015), которые обнаружили, что после дефолиации в течение вегетационного периода 2009 г. (январь и февраль 2009 г.) в лесах *N. pumilio*, вызванных *Ormiscodes amphimone* в чилийской Патагонии ( $46,1^\circ$  ю.ш.,  $72,1^\circ$  з.д.), деревья испытали самые высокие угнетения прироста на следующий год после события, а также значительное угнетение на второй год после события.

#### 4.4 Обсуждение результатов

Полученные результаты, хотя и не позволяют убедительно установить источник 7-летней цикличности, статистически подтверждают снижение прироста после дефолиации, вызванной насекомыми-вредителями, на одном эталонном участке. В то же время сравнение рядов прироста и семеношения не подтвердило гипотезу о влиянии семеношения на снижение прироста деревьев. Другим доказательством против гипотезы влияния семеношения на прирост является то, что производство семян асинхронно в разных частях острова (ряды за 12–16 лет, неопубликованные данные), в то время как все основные угнетения прироста синхронны по всему острову, что также подтверждается набором данных, использованным в данной главе, и состоящим из 44 древесно-кольцевых хронологий.

Случаи дефолиации деревьев по причине объедания гусеницами известны на островах Огненной Земли, хотя их прямой и постоянный мониторинг отсутствует. Из-за отсутствия такого мониторинга мы не знаем, например, какова площадь дефолиации в каждый год. Наличие подобных рядов могло бы позволить напрямую сравнивать временные ряды дефолиации с временными рядами ширины годичных колец.

Летом 2009–2010 гг. был отмечен один из случаев дефолиации, а позже были отобраны образцы пораженных и контрольных деревьев для оценки влияния дефолиации на прирост деревьев. Полученные результаты подтверждают угнетение прироста деревьев в течение двух лет после события дефолиации. Но так как это единственное исследованное событие, связь одного из угнетений прироста с событием 2009–2010 гг. не полностью обосновывает предположение о регулярных угнетениях прироста, связанными с дефолиацией, а скорее не опровергает его на основе имеющихся данных.

Анализ рядов температуры и осадков в исследуемом регионе выявляет статистически значимые пики на аналогичных длинах волн около 7 лет (5,7–7,8 лет), причем наиболее выраженные пики наблюдаются в осадках в июле и августе (7,2 и 6,6 лет), а также в рядах температуры марта, мая и ноября (7,8, 7,2 и 5,7 года). Следовательно, периодический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях, который, вероятно, создается вспышками насекомых-вредителей и который, если его не удалить, ослабляет климатический сигнал в хронологиях, все же может быть косвенным следствием климатической изменчивости. Колебания климатических параметров могут влиять на изменения в популяции насекомых, тем самым опосредованно вызывая угнетения прироста деревьев (Paritsis and Veblen 2011a).

Как уже было сказано ранее, стандартизация используется для устранения неклиматического сигнала, но также может устранять некоторую часть климатической изменчивости, особенно на низких частотах и длительных временных масштабах (Cook et al. 1995; Matskovsky and Helama 2016b). Комплекс факторов, влияющих на формирование годичных колец, не всегда укладывается в математическую модель, поэтому нельзя полностью избежать риска устранения определенной части климатической изменчивости. В данной главе предложен метод устранения устойчивых циклических нарушений, не вызванных климатическими условиями, и которые, скорее всего, связаны с устойчивыми периодическими изменениями популяций дефолирующих насекомых. Как показывают полученные результаты, этот метод помогает усилить климатический сигнал,

содержащийся в древесно-кольцевых хронологиях. Однако, как и любой процесс стандартизации, этот метод может удалить и некоторую часть климатической информации. Полученные результаты показывают, что скорректированные хронологии содержат ценную информацию о климате прошлого, и вместо исключения таких хронологий из дендроклиматических исследований, представляется разумным воспользоваться усиленным климатическим сигналом, который можно извлечь из них с помощью предлагаемой методики. Более того, можно ожидать, что предложенная методика может оказывать положительное влияние и на долгопериодный климатический сигнал в ДКХ. Это связано с принципиальной возможностью метода устранять неклиматический сигнал с устойчивой периодичностью, но с изменяющейся дисперсией. Таким образом, при уменьшении разного количества дисперсии неклиматического происхождения в разных частях хронологии, возможны ее изменения и в низкочастотной части спектра. Это, к примеру, заметно на рис. 4.1 Д в некотором усилении мощности спектра на длине волны около 30–35 лет для скорректированных хронологий. Корректировка низкочастотной части спектра могла бы быть еще сильнее, если бы удаляемый периодичный сигнал не был симметричным (синусоидальным), а, например, представлял бы только нижнюю половину синусоиды, позволяя корректировать именно угнетения прироста, и не затрагивая положительные значения. В данной главе подобная модификация метода не рассматривается.

По мере того, как дендроклиматология расширяется географически от традиционных регионов с сильно выраженным лимитирующим фактором и отдельно стоящих деревьев до более умеренных зон и лесов с сомкнутым древостоем, исследователи прилагают все больше усилий для изучения как дендроэкологических, так и дендроклиматических эффектов в одних и тех же хронологиях. Исследователи использовали разные подходы к оценке климатического сигнала, в той или иной степени скрытого экологическими и другими факторами. Эти подходы варьируются от простого исключения лет, затронутых нашествиями насекомых (Clark et al. 2017), до более сложных методов, основанных на анализе неоднородностей временных рядов (Druckenbrod 2005; Rydval et al. 2015, 2018; Lee et al. 2017). Последние также позволяют выделять историю нарушений прироста из древесно-кольцевых хронологий. Предложенный в данной главе подход ограничен возмущениями с устойчивой периодичностью фиксированной частоты.

Как видно из рисунка 4.1 В, эффект корректировки может быть даже более полезен для климатических реконструкций, чем это можно оценить по данным инструментального периода, поскольку величина (дисперсия) удаляемой неклиматической изменчивости значительно выше в 19 веке по сравнению с 20 веком, а в 18 веке, наоборот, значительно ниже. Следовательно, даже если в связи с отсутствием инструментальных данных трудно оценить усиление климатического сигнала за прошлые периоды, предложенная корректировка должна быть полезна для исследований климата прошлого даже в тех регионах, где недавние климатические изменения привели к ослаблению устойчивой цикличности в приростах деревьев (Esper et al. 2007; Johnson et al. 2010).

Имеются также различные свидетельства зависимости периодичности и интенсивности нашествий насекомых от климатических факторов. (Esper et al. 2007) исследовали аналогичные устойчивые периодические циклы продолжительностью около 9 лет, вызванные дефолиацией от листовенничной листовертки в Альпах. Они обнаружили, что эти циклы ослабли в конце 20-го века, что, вероятно, связано с потеплением. Увеличение высоты над уровнем моря, оптимальной для роста популяции, в период потепления прошлого века почти до предела распространения листовенницы-хозяина, вероятно, ослабило популяционные циклы насекомых (Johnson et al., 2010). В Южной Патагонии хронологии, содержащие наиболее ярко выраженный цикл, расположены в самой южной части – на Исла-Гранде архипелага Огненная Земля и на острове Наварино, находящемся южнее Исла-Гранде. Хронологии с острова Наварино, вероятно, содержат квази-семилетний сигнал с наибольшей дисперсией, что видно на рисунках из статьи (Aravena et al. 2002). Вспышки вредителей в континентальной части южной Патагонии тоже присутствуют, но они не выражены с такой устойчивой периодичностью (Paritsis et al. 2009; Paritsis and Veblen 2011b; Palacios 2013). Все эти факты указывают на то, что температура воздуха является важным фактором контроля изменчивости популяции насекомых.

Подобно предыдущим исследованиям климатического сигнала *N. pumilio* на Огненной Земле и в южной части Патагонии (Boninsegna et al. 1989; Villalba et al. 1997a, 2003; Aravena et al. 2002; Lara et al. 2005; Massaccesi et al. 2008), в исследованном наборе данных обнаружена положительная реакция деревьев на летние температуры. Кроме того, обнаружен значимый отклик на облачность (положительный) и на частоту морозных дней (отрицательный). Обновленные до годовичного кольца 2016 года хронологии также

позволили проследить изменения климатического отклика во времени и выявить недавнее снижение отклика на температуру. Снижение корреляции этих хронологий Южного полушария с летними температурами в последние десятилетия аналогично так называемой проблеме дивергенции в высоких широтах Северного полушария (D'Arrigo et al. 2008), см. также раздел 1.5. Возможные причины дивергенции, которые обсуждаются в научной литературе, включают вызванный повышением температуры стресс растений от засухи, нелинейные пороговые значения лимитирующих факторов или меняющаяся во времени реакция на современное потепление, ранее таяние снега и связанные с этим изменения сезонности, а также изменяющиеся зависимости прироста от климатических параметров, например, максимальных, минимальных и средних температур. Однако летняя температура воздуха, являющаяся основным лимитирующим фактором для исследованных деревьев, в последние десятилетия на Огненной Земле не повышается, и даже имеет тенденцию к снижению с 1980-х годов. Другой возможной причиной дивергенции является «глобальное затемнение» - явление, проявившееся в последние десятилетия в уменьшении количества солнечного излучения, доступного для фотосинтеза и роста растений в больших масштабах, но исследованного в основном в высоких широтах Северного полушария (D'Arrigo et al. 2008). Эта гипотеза отчасти подтверждается изменением знака отклика деревьев на облачность в последние десятилетия (рис. 4.2), однако специальные исследования хронологий *N. pumilio* на Огненной Земле, посвященные этому вопросу, отсутствуют.

Пригодность хронологий *N. pumilio* с Огненной Земли для дендроклиматологических реконструкций до сих пор не является безусловной. Предыдущие исследования свидетельствуют о том, что ширина годовых колец *N. pumilio* является подходящим параметром для реконструкций климатических параметров (Boninsegna et al. 1989; Villalba et al. 1997b; Aravena et al. 2002; D'Arrigo and Villalba 2000). Однако в предыдущих исследованиях использовались хронологии *N. pumilio* наряду с хронологиями *N. betuloides*, что усложняет оценку вклада каждого вида в полученные реконструкции. В других случаях, например, для реконструкции температуры южной Патагонии (Р. Вийяльба, личное сообщение, 2018 г.) или для реконструкция засушливости для юга Южной Америки (М. Моралес, личное сообщение, 2018 г.), хронологии *N. pumilio*, содержащие ярко выраженную цикличность, были намеренно исключены из набора данных, чтобы избежать попадание этого неклиматического сигнала в реконструкции. Данные ширины годовых колец *N. pumilio* с Огненной Земли показывают очень высокую корреляцию между



деревьями, наблюдающуюся на большинстве проанализированных участков. Хронологии с разных участков также синхронизированы. Подобную синхронность обычно связывают с общим фактором, воздействующим на деревья, чаще всего с каким-либо климатическим фактором или набором климатических факторов. Однако неклиматическая 7-летняя периодичность также может быть ответственна за высокую взаимосвязь, наряду с климатом, если эта периодичность обусловлена общерегиональным экологическим фактором, например вспышками насекомых-вредителей, охватывающими весь остров. 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. Поэтому, на основании полученных результатов, предлагается включать скорректированные хронологии в наборы дендроклиматических данных, используемых для изучения климата прошлого на Огненной Земле.

#### 4.5 Выводы к главе 4

1. Большинство хронологий *N. pumilio* в аргентинской части Огненной Земли имеет ярко выраженную устойчивую квази-семилетнюю цикличность неклиматического происхождения, что подтверждается повышением климатического отклика хронологий, скорректированных с помощью удаления из них квази-семилетней периодической составляющей, а также лучшим их воспроизведением с помощью упрощенной имитационной модели роста деревьев VS-Lite.
2. Было статистически подтверждено сокращение прироста деревьев после дефолиации насекомыми-вредителями в один год на одной пробной площади на Огненной Земле. Гипотеза об уменьшении прироста после высокого урожая семян на одной пробной площади с 12-летними измерениями семеношения была отклонена. Не делая окончательного вывода о природе обнаруженного квази-семилетнего цикла в хронологиях ширины годичных колец деревьев, можно предположить, что причиной указанной цикличности являются периодические вспышки численности насекомых.
3. Предложенный метод удаления неклиматической компоненты из древесно-кольцевых хронологий, основанный на SSA, следует применить к хронологиям

*N. pumilio* на Огненной Земле, а также к другим хронологиям, подверженным устойчивым периодическим событиям дефолиации (например, *Larix* в Альпах), чтобы использовать эти хронологии для дендроклиматических реконструкций.

4. Предложенный метод корректировки хронологий может быть также полезен для усиления долгопериодного климатического сигнала, что связано с его возможностью удалять периодическую неклиматическую компоненту с изменяющейся во времени дисперсией. В случае модификации метода для удаления несимметричного сигнала, эффект корректировки долгопериодного сигнала может быть выражен еще сильнее.

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

В данной главе на основе скорректированных хронологий из предыдущей главы, а также на основе расширенного набора древесно-кольцевых хронологий для Огненной Земли построена реконструкция температуры декабря-февраля для этого региона. Хотя древесно-кольцевые данные для этой реконструкции были получены только из живых деревьев, из-за чего невозможно применение метода RCS, и чем ограничивается возможность извлечения долгопериодной климатической изменчивости из этих данных, сравнение полученной реконструкции с несколькими реконструкциями для южной части Южной Америки, в том числе с одной реконструкцией на основе косвенных источников данных о климате прошлого различного происхождения (мульти-прокси), позволяет сделать выводы о соотношении долгопериодной климатической изменчивости в различных реконструкциях теплого периода для региона.

### **5.1 Введение**

Архипелаг Огненная Земля на южной оконечности Южной Америки занимает положение, особенно подходящее для проведения палеоклиматических исследований (Boninsegna et al. 1989; Roig et al. 1996). Огненная Земля — самая южная территория с лесами в мире, расположенная недалеко от Антарктического полуострова. На климат большей части Патагонии значительное влияние оказывают субтропические антициклоны с центрами над Атлантическим и Тихим океанами, тогда как на термический режим на Огненной Земле в течение всего года оказывают влияние Антарктическое циркумполярное течение и субполярные западные ветры (Garreaud et al. 2009, 2013; Jacques-Copere and Brönnimann 2014). Климат Огненной Земли относится к субполярному океаническому типу по классификации Кеппена с холодным летом (средняя температура около 9 °C) и мягкой зимой (средняя температура около 0 °C). На южных островах архипелага среднегодовая температура колеблется около значения 3°C, зимняя температура – ниже 0°C, годовая амплитуда температур достигает 5°C (Paruelo et al. 1998). Количество осадков достигает максимума на юго-западном побережье (свыше 1000 мм/год) за счет орографического барьерного эффекта Анд и снижается до 500-700 мм/год в юго-восточной части и до 300

мм/год в северной части архипелага (Garreaud et al. 2013). Осадки на Огненной Земле выпадают почти равномерно в течение года.

Поскольку климат Огненной Земли находится под влиянием крупномасштабных систем атмосферной циркуляции, можно было бы ожидать существенной связи температуры воздуха с основными атмосферными и атмосферно-океаническими модами Южного полушария: Антарктическим колебанием (АК) и Эль-Ниньо-Южным колебанием (ЭНЮК). Тем не менее ряд исследований показал, что линейная корреляция летних аномалий температуры с основными индексами атмосферной циркуляции не подтверждает подобную связь. (Jacques-Copere and Brönnimann 2014) показали, что коэффициенты корреляции межгодовых летних аномалий температуры в южной части Южной Америки с индексами ЭНЮК 3.4 и АК за 1907–2001 гг. сильно зависят от временного периода. В частности, положительная значимая корреляция обнаружена для нескольких периодов в середине XX века, но при этом для 1980–2001 гг. выявлена отрицательная корреляция с ЭНЮК 3,4 (-0,23) и почти нулевая с АК (0,09). Согласно Маршаллу с соавторами (Marshall et al. 2006) корреляция летней температуры в Пунта-Аренас с индексом АК равнялась 0,16. Следует отметить, что индексы атмосферной циркуляции в большинстве случаев являются простыми числовыми показателями крупномасштабных процессов циркуляции и могут быть нерепрезентативными для некоторых регионов из-за региональных особенностей проявления данных процессов.

Помимо своего уникального местоположения, на Огненной Земле представлено множество косвенных архивов палеоклиматической информации, включая торфяные болота, озера, ледники и деревья (Roig et al. 1996; Vogtmei et al. 2010). Наиболее подробную (т.е. с высоким разрешением) информацию о климатических и экологических изменениях последних тысячелетий можно получить из годовичных колец деревьев. Тем не менее, дендрохронологических исследований на Огненной Земле довольно мало, и многие вопросы остаются открытыми, например, следующие: достаточно ли чувствительны деревья, растущие на Огненной Земле, чтобы их можно было использовать для реконструкции климата? Какие климатические параметры можно реконструировать по данным годовичных колец деревьев, включая соответствующие крупномасштабные и региональные процессы в атмосфере и океане? Возможно ли извлечь информацию о

долгопериодной климатической изменчивости из древесно-кольцевых данных, доступных на Огненной Земле?

В данной главе рассматриваются эти вопросы. С этой целью был собран набор древесно-кольцевых хронологий, включающий 44 хронологии *Nothofagus pumilio* и 19 хронологий *N. betuloides* (Boninsegna et al. 1989; Massaccesi et al. 2008; Soto-Rogel and Aravena 2017; Matskovsky et al. 2019; Lankabure 2011; Roig et al. 2010). С использованием этого набора данных было произведено сравнение методов регрессии частными наименьшими квадратами (РЧНК) и регрессии на главные компоненты (РГК) в реконструкциях на основе множества ДКХ. Кроме того, собранный набор из 63 хронологий использован для построения реконструкции летней температуры (с декабря по февраль) с 1765 года. Чтобы лучше понять факторы, влияющие на межгодовые изменения летней температуры и таким образом вписать полученную реконструкцию в более широкий палеоклиматический контекст, были проанализированы региональные барические режимы, связанные с аномалиями летней температуры.

## 5.2 Материалы и методы

### 5.2.1 Наборы климатических данных

Климатические данные из архива CRU TS 4.01 (Harris et al. 2020, разрешение 0,5°) были усреднены для 49 узлов сетки, покрывающих исследуемую территорию (73,75° – 66,75° з.д., 53,75° – 55,75° ю.ш.). Самый продолжительный ряд метеорологических наблюдений, использованный для формирования данных CRU TS и расположенный в пределах выбранного региона, начинается с 1931 г. (метеостанция Ушуайя). Однако станции Пунта-Аренас и Пунта-Дунгенес, наблюдения на которых велись в период с 1901–2016 гг., хотя и расположены к северу от региона исследования, вносят свой вклад в данные CRU TS из-за использованных методов интерполяции и могут быть использованы для продления рядов. Таким образом, в этой работе использовались средние ежемесячные значения температуры за весь период 1901–2016 гг.

Также были использованы данные о высоте геопотенциала и скорости ветра для уровней 1000 мб, 850 мб и 500 мб из реанализа 20th Century Reanalysis, версия 3 (Slivinski et al. 2019, разрешение 1,0°). Были использованы средние значения индекса АК за декабрь-

февраль на основе реконструкции (Visbeck 2009). Ежемесячные значения индекса АК, основанные на методологии (Marshall 2003), были получены с сайта Британской антарктической службы (<https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>). Ежемесячные значения индекса ЭНЮК 3,4 (Trenberth and Stepaniak 2001) за период 1870–2020 гг., основанные на данных HadISST (Rayner et al. 2003), были получены с сайта Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA: [https://psl.noaa.gov/gcos\\_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.data](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.data).

### 5.2.2 Древесно-кольцевые данные и построение хронологий

Настоящее исследование основано на 63 хронологиях ширины годичных колец *Nothofagus pumilio* и *N. betuloides*, в основном происходящих из аргентинского сектора Огненной Земли, за исключением семи хронологий *N. betuloides* из чилийского сектора Огненной Земли (рис. 5.1). Хронологии аргентинского сектора были получены в результате нескольких проведенных исследований в течение последних 30 лет (Boninsegna et al. 1989; Roig et al. 1996; Massaccesi et al. 2008; Matskovsky et al. 2019). Из них 44 хронологии *N. pumilio* были описаны в предыдущей главе и использованы для анализа семилетних циклов неклиматической природы. Было проведено удаление этих циклов для усиления климатического сигнала, содержащегося в ширине годичных колец. Шесть хронологий *N. betuloides* из Чили были описаны в работе (Fuentes et al. 2019). Самая длинная хронология *N. betuloides* (LRB, 1492–2002 гг., см. Таблицу П5.1) описана в работах Llancabure (2011) и (Soto-Rogel and Aravena 2017). Остальные 12 хронологий *N. betuloides* из Аргентины были описаны в работах (Boninsegna et al. 1989) и (Roig et al. 2010). Основные статистические данные по всем хронологиям, использованным в исследовании, приведены в таблице П5.1. Качество всех измерений ширины колец, в том числе архивных, было проверено с использованием программы COFESHA (Grissino-Mayer 2001). Хронологии годичных колец были построены с использованием программы ARSTAN аналогично методике, изложенной в предыдущей главе (раздел 4.2.1). Выраженный сигнал популяции (Expressed Population Signal, EPS), рассчитанный в 30-летнем скользящем окне с 29-летним перекрытием, использовался для оценки того, насколько хорошо хронология, основанная на конечной выборке, соответствует теоретической хронологии для популяции, основанной на бесконечном числе деревьев (Wigley et al. 1984). При построении реконструкции значение

EPS равное 0,85 использовалось в качестве порога для отсечения более ранней части хронологий с низкой репликацией.

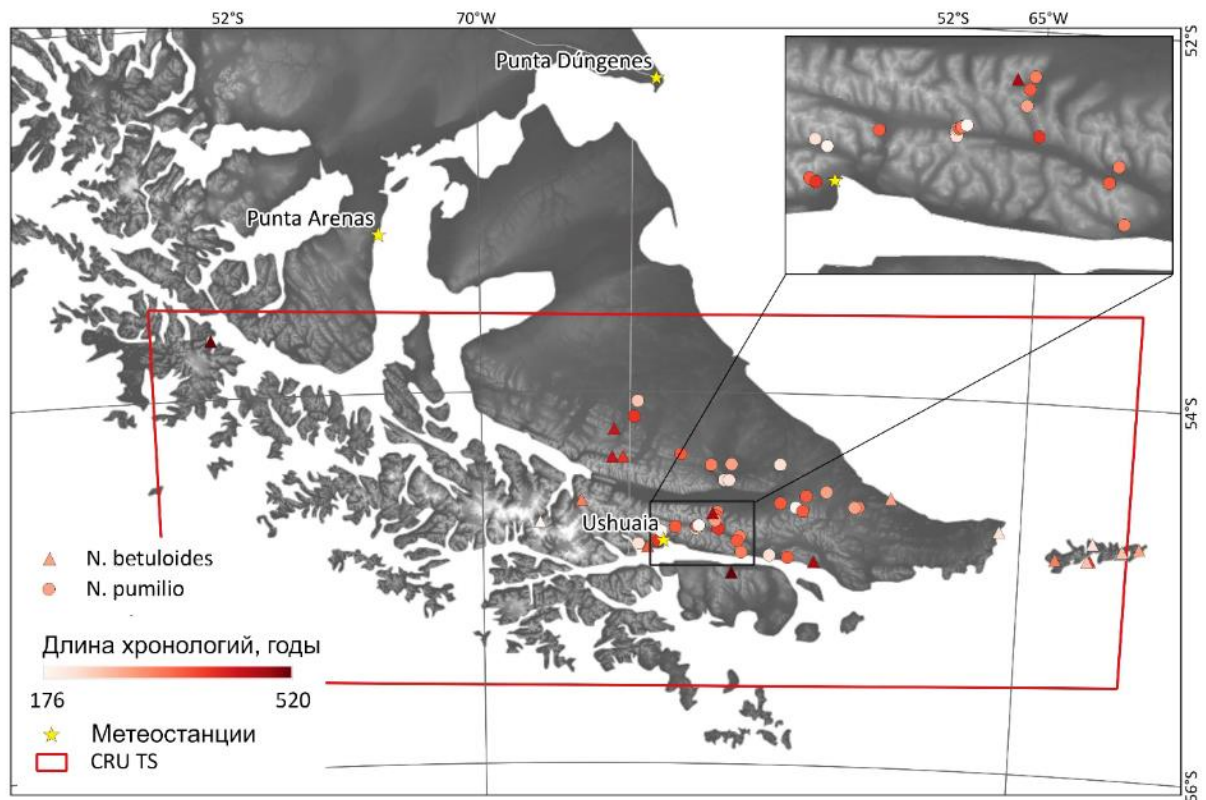


Рисунок 5.1 – Карта расположения ДКХ, использованных в этом исследовании. Цвет указывает длину хронологии. Границы для выбора данных из архива CRU TS, затем усредненных для получения целевой климатической переменной реконструкции, отмечены красным прямоугольником. Метеостанции с самыми длинными рядами в регионе отмечены звездочками. Топография показана в оттенках серого.

### 5.2.3 Методика построения реконструкции

#### 5.2.3.1 Регрессия частными наименьшими квадратами и регрессия на главные компоненты

Чтобы обосновать эффективность метода РЧНК, который был использован для реконструкции, здесь приводится сравнение с результатами более традиционного метода РГК. Реконструкция летней температуры (зависимая переменная) по нескольким ДКХ

(независимые переменные) была проведена с использованием обоих методов. Хотя физическая логика процесса является обратной (прирост деревьев зависит от изменений климатического параметра, а не наоборот), постановка задачи для ее решения с использованием методов, основанных на анализе данных, использует именно такую последовательность – от данных к процессу (Reichstein et al. 2019). Метод РГК широко используется в дендроклиматологии, и в частности в методе поточечной регрессии (Point-by-point regression, PPR, Cook et al. 1999), который широко используется для пространственных реконструкций засушливости на основе древесно-кольцевых данных (Cook et al. 2015, 2020; Morales et al. 2020), поэтому здесь он подробно не описывается. Метод РЧНК был заимствован из социальных наук, но позже нашел широкое применение в основном в хемометрике (Abdi 2010). Он также использовался в некоторых дендроклиматологических исследованиях (например, Kalela-Brundin 1999; Timilsena and Piechota 2008; Bauwe et al. 2016), но не получил широкого признания. Оба метода помогают справиться с проблемами, связанными с мультиколлинеарностью (взаимной корреляцией предикторов), которая неизбежна в случае использования в качестве предикторов ДКХ из одного региона. Оба метода используют скрытые переменные, то есть переменные, которые выводятся из наблюдаемых переменных с помощью математической модели, в данном случае линейной. Принципиальное различие между РЧНК и РГК состоит в том, что при построении скрытых переменных (которые в случае РГК называются главными компонентами) из исходных предикторов последний метод максимизирует объясненную дисперсию в наборе предикторов, тогда как первый метод максимизирует объясненную дисперсию зависимой переменной. Другими словами, РГК разлагает матрицу  $X$  независимых переменных, чтобы получить скрытые переменные, наилучшим образом объясняющие дисперсию  $X$ . Напротив, РЧНК находит скрытые переменные из  $X$ , которые лучше всего объясняют дисперсию независимых переменных  $Y$ . Здесь  $X$  и  $Y$  – матрицы независимых и зависимых переменных, соответственно. Подробное математическое описание РЧНК см. в работе (Abdi 2010) и по ссылкам в ней.

В данной главе описываются эксперименты, направленные на то, чтобы проследить, как меняется производительность методов РЧНК и РГК в зависимости от количества предикторов и количества выбранных скрытых переменных. Чтобы оценить эффективность методов и не допустить возможное переобучение, в качестве характеристики качества работы метода использовался коэффициент детерминации ( $R^2$ ) на скользящем контроле.



Процесс оценки качества на скользящем контроле состоял из нескольких итераций, где вся выборка разбивалась на  $k$  блоков ( $k$ -fold cross-validation) с  $k$  изменяющимся от 2 до 6, и для каждого  $k$  разбиение повторялось по 10 раз. Данные, не включенные в калибровку, использовались для расчета  $R^2$ . Чтобы оценить качество работы методов с разным количеством предикторов и разным количеством скрытых переменных, случайным образом выбиралось определенное количество предикторов из полного набора хронологий и рассчитывался  $R^2$  для разного количества скрытых переменных от единицы до числа выбранных предикторов. Чтобы уменьшить зависимость результатов от конкретных наборов хороших или плохих предикторов, было произведено по 50 итераций со случайными подмножествами предикторов для каждого количества предикторов и каждого количества скрытых переменных. Полный алгоритм оценки качества методов приведен ниже.

Следующий алгоритм скользящего контроля использовался для достижения компромисса между размером выборки, используемой для обучения модели, и размером выборки, используемой для проверки модели на независимых данных.

Для расчета результатов, представленных на рисунке П5.1 использовались следующие циклы:

- для число\_предикторов от 1 до 63:
  - для число\_скрытых\_переменных от 1 до 35:
    - для перестановки\_предикторов от 1 до 50:
      - произвольно переставить порядок предикторов и выбрать число\_предикторов из всех предикторов
    - для  $k$  от 2 до 6:
      - для повтор\_валидации от 1 до 10:
        - случайным образом разделить выборку для калибровки и валидации на  $k$  равных частей
        - использовать  $k-1$  частей выборки для калибровки и одну для валидации

- рассчитать  $R^2$  для валидационной части выборки
- Для каждого числа предикторов и каждого числа скрытых переменных значения  $R^2$  для всех проведенных расчетов усреднялись.

При применении методов, использующих скрытые переменные, таких как РГК и РЧНК, возникает вопрос выбора числа скрытых переменных. В отличие от РГК, в РЧНК скрытые переменные упорядочиваются по убыванию объясненной дисперсии зависимой переменной. Следовательно, в РЧНК кумулятивная объясненная дисперсия целевой переменной постоянно увеличивается с добавлением новых скрытых переменных. В РГК она увеличивается неравномерно, со значительными скачками при добавлении главных компонент, объясняющих значительную величину дисперсии зависимой переменной. В то же время при использовании РЧНК особенно важно использовать скользящий контроль, так как этот метод сильно подвержен переобучению из-за своей способности подстраиваться под целевую переменную (Geladi and Kowalski 1986; Abdi 2010). Здесь скользящий контроль использовался как для определения качества построенной регрессионной модели, так и для выбора оптимального числа скрытых переменных. В целом, проведенный эксперимент можно рассматривать как теоретический пример применения одного шага метода поточечной регрессии (т.е. расчета реконструкции для одного узла пространственной сетки), выполненный на реальных данных для архипелага Огненная Земля.

### ***5.2.3.2 Подход со вложенными реконструкциями***

Чтобы итоговая реконструкция сохраняла преимущества, связанные как с большим числом использованных хронологий, так и с большой длиной самых протяженных из них, был использован подход «вложенных реконструкций» (Nested Reconstruction Approach, (Meeko 1997). При таком подходе разные части реконструкции строятся на основе различных наборов хронологий. Таким образом, каждая часть реконструкции имеет разную статистику калибровки и верификации, при этом качество реконструкции ухудшается для более отдаленного периода из-за уменьшения числа использованных хронологий. Таким образом, с одной стороны, обеспечивается максимально разумная продолжительность реконструкции, а с другой – максимальное качество реконструкции для каждого периода. Следующие статистические характеристики использовались для описания качества каждой части реконструкции: коэффициент корреляции Пирсона  $r$ ,  $R^2$  на калибровке и  $R^2$  на

скользящем контроле (по аналогии с алгоритмом, приведенном в разделе 5.2.3.1). В данной главе под термином «дисперсия, объясненная реконструкцией» подразумеваются значения  $R^2$  на скользящем контроле за инструментальный период.

При выборе целевой переменной для реконструкции учитывался ряд соображений. Во-первых, ранее было продемонстрировано, что температура воздуха в разные летние месяцы является основным лимитирующим фактором роста деревьев в регионе, с самыми высокими корреляциями в декабре для хронологий *N. pumilio* и в январе для хронологий *N. betuloides* (Massaccesi et al. 2008; Fuentes et al. 2019; Matskovsky et al. 2019). Во-вторых, температуры декабря-февраля широко используются в климатических и палеоклиматических исследованиях, включая моделирование. Следовательно, данная целевая переменная является предпочтительной для совместимости с другими исследованиями. В-третьих, в экспериментах с различными целевыми переменными было обнаружено, что средняя температура декабря-февраля является одной из наиболее подходящих для исследованного набора данных.

Для выбора итогового набора предикторов были протестированы различные наборы древесно-кольцевых хронологий. Использовался ручной аналог пошаговой регрессии с добавлением и удалением предикторов для поиска наилучшего подмножества.

Для количественной оценки неопределенностей, связанных с реконструкцией, был использован метод бутстреппинга. Был построен большой набор гипотетических реконструкций на основе уменьшенного количества хронологий в каждом наборе и уменьшенной продолжительности периода калибровки. Для каждой из индивидуальных реконструкций, использованных для построения итоговой вложенной реконструкции, убиралось от 0 до 2 хронологий-предикторов, а длина периода калибровки сокращалась до 50-90% от полной длины. Эти изменения были сгенерированы случайным образом и повторены в общей сложности 35650 раз. Каждый раз строилась одна гипотетическая реконструкция. Оценки неопределенности были основаны на процентилях полученного распределения значений за каждый календарный год. Таким образом, оценки неопределенности, приведенные далее, связаны с объемом доступных косвенных данных (исключение хронологий), а также с наличием и надежностью инструментальных данных (сокращение периода калибровки).

Для оценки того, насколько хорошо реконструкция воспроизводит экстремальные значения инструментальных данных, использовался тест сопоставления экстремальных значений – «Extreme Value Capture» (EVC) (McCarroll et al. 2015). Тест EVC — это статистический тест, основанный на биномиальном распределении. Использовались следующие параметры биномиального распределения:  $n=10$  (количество экстремальных лет) и  $p=0,098$  ( $p=10/102$  — вероятность каждого года из 102 лет общего периода 1901–2002 гг. попасть в 10 экстремальных лет). Десять максимумов и десять минимумов тестировались отдельно.

## 5.3 Результаты

### 5.3.1 Сравнение регрессии методом частных наименьших квадратов и регрессии на главные компоненты

Ниже представлены результаты серии экспериментов, направленных на оценку изменения эффективности методов РЧНК и РГК с увеличением числа предикторов и изменяющимся числом скрытых переменных (рис. П5.1). Для метода РГК максимальное значение  $R^2$  на скользящем контроле неуклонно возрастало с увеличением количества используемых предикторов. Оно также увеличивалось с увеличением числа использованных главных компонент (ГК), достигая максимальных значений при 10–25 ГК (рис. П5.1А). Оптимальное число ГК для достижения максимальных значений  $R^2$  нелегко определить. Например, при использовании более 50 предикторов были получены сопоставимые значения  $R^2$  для интервала количества выбранных ГК от 15 до 25. Для метода РЧНК максимальное значение  $R^2$  на скользящем контроле также неуклонно увеличивалось с увеличением числа используемых предикторов. В отличие от РГК, метод РЧНК достигает максимальных значений  $R^2$  с гораздо меньшим числом выбранных скрытых переменных (3-5). Большее количество скрытых переменных не дает улучшения по  $R^2$ . Наоборот, предсказательная способность метода быстро падает, особенно когда число предикторов велико. Это можно объяснить способностью РЧНК концентрировать сигнал в первых скрытых переменных, а в остальных при этом остается шумовая информация. Рисунок П5.1В представляет собой срез результатов, представленных на рисунках П5.1А и П5.1Б для максимального количества предикторов ( $N = 63$ ). Здесь можно сделать несколько дополнительных наблюдений. Во-первых, метод РГК показывает отрицательные значения  $R^2$  для первых нескольких ГК. Это означает, что первых главных компонент,

представляющих наибольшую часть общей изменчивости исследованного набора древесно-кольцевых данных, недостаточно для адекватного представления целевой переменной, и что требуются дополнительные компоненты более низкого порядка, также содержащие важную информацию о климате. Во-вторых, метод РГК показывает схожие значения  $R^2$  для числа ГК от 15 до 25, в то время как разброс значений  $R^2$ , полученных в различных экспериментах с рандомизированными выборками, увеличивается с увеличением числа ГК. Меньший разброс указывает на преимущество меньшего количества выбранных скрытых переменных, что позволяет отдать предпочтение методу РЧНК, наилучшим образом работающим с 3-5 скрытыми переменными. В-третьих, РЧНК неизменно превосходила РГК в проведенных экспериментах: максимальное среднее значение  $R^2$  для метода РЧНК превосходило соответствующие значения для РГК для каждого числа предикторов (рис. П5.1Г).

Хотя рисунок П5.1 показывает, что чем больше имеется предикторов, тем выше полученные значения  $R^2$ , это не означает, что качество результатов не может быть повышено при меньшем количестве предикторов. Проведенные эксперименты показали, что отбор предикторов с помощью процедуры, аналогичной пошаговой регрессии, помогает улучшить результаты. На рисунке П5.3 показаны результаты для 10 лучших предикторов, которые в конечном итоге были использованы для части реконструкции с максимальной объясненной дисперсией (1889–2002 гг. н.э.). В отличие от РЧНК, для которой большая часть целевой дисперсии с монотонным повышением объясняется первыми пятью скрытыми переменными, для РГК можно заметить, что 3-я, 6-я и 10-я ГК добавили больше информации, для объяснения целевой переменной, чем другие ГК. Это еще одно подтверждение того наблюдения, что важная информация об изменчивости климата может быть скрыта в главных компонентах более низкого порядка (тех, которые объясняют меньшее количество общей дисперсии набора предикторов). В описанном на рисунке П5.3 случае и РГК, и РЧНК достигли одинаковых значений  $R^2$  при максимальном количестве выбранных скрытых переменных.

Дополнительные эксперименты были проведены для того, чтобы убедиться, что предложенная схема скользящего контроля адекватна, и что применение РЧНК не приводит к переобучению из-за его способности строить скрытые переменные, настраивающиеся на целевую переменную при калибровке. Эксперимент, приведенный на рис. П5.1, был

проведен повторно, но со следующими изменениями. Значения целевой переменной (температура декабря-февраля) были случайным образом перемешаны внутри инструментального периода. Таким образом проверялась гипотеза о том, что на основе имеющегося набора данных можно восстановить не только реальный температурный ряд, но и некий искусственный ряд, полученный на его основе. Если бы это было так, налицо было бы «переобучение» методов, что означает слишком сильную настройку на периоде калибровки и отсутствие прогностической способности вне его. Результаты показаны на рис. П5.2. Признаков переобучения не наблюдается, поскольку ряд температур со случайно переставленными значениями не может быть предсказан на основе того же набора предикторов. Эти результаты вместе с представленными ранее (рис. П5.1) подтверждают, что и РГК, и РЧНК помогают извлекать полезную климатическую информацию из набора древесно-кольцевых предикторов, и что использованный алгоритм скользящего контроля адекватен. Более того, снова наблюдается некоторое преимущество РЧНК перед РГК, поскольку метод показывает меньше признаков переобучения (рис. П5.1В, Г), а именно меньшее количество положительных значений  $R^2$  на скользящем контроле.

Чтобы изучить возможное влияние тренда в температурных данных на полученные результаты, были проведены дополнительные эксперименты с рядами температуры с удаленным линейным трендом в качестве целевой переменной и тем же набором предикторов. Результаты очень похожи: температура без тренда объясняется на 2% лучше, чем исходная температура для наилучшего набора из 10 предикторов ( $R^2 = 0,519$  на скользящем контроле). Таким образом, наличие тренда в рядах температур не влияет на полученные результаты.

### 5.3.2 Реконструкция летней температуры на Огненной Земле с 1765 г.

Итоговая реконструкция (рис. 5.2) была получена для целевой переменной летней температуры воздуха с использованием метода РЧНК и подхода со вложенными реконструкциями. На рисунке 5.3 показаны отдельные реконструкции, части которых были объединены в итоговую реконструкцию. Их характеристики описаны в таблице 5.1. Для построения каждой из них использован метод РЧНК с четырьмя скрытыми переменными. По мере уменьшения числа доступных хронологий и их репликации, качество реконструкции также снижается во времени. Почти 50% дисперсии объясняется в наиболее поздней части реконструкции (1889–2002 гг.), и только 37% дисперсии объясняется самой

ранней частью реконструкции (1765–1853 гг.). Тем не менее, статистические показатели на всем протяжении реконструкции свидетельствуют о ее хорошем качестве, что означает, что она несет полезную информацию о колебаниях летних температур в прошлом.

Современная часть реконструкции хорошо согласуется с инструментальными данными, включая высоко- и низкочастотные колебания (рис. 5.2А, Б). Наиболее тесное совпадение наблюдается для первой половины 20 века, тогда как во второй половине наблюдается некоторое расхождение, в том числе похолодание 1970–1971 гг., которое не воспроизводится реконструкцией. Это расхождение согласуется с ослаблением отклика на температуру хронологий ширины годичных колец *N. pumilio* на Огненной Земле с 1970-х годов (глава 4). С использованием метода EVC была оценена вероятность того, что 10 минимальных и 10 максимальных лет полученной реконструкции для инструментального периода соответствуют инструментальным данным. Для максимумов получено совпадение в 5 из 10 лет (1902, 1903, 1904, 1918, 1919;  $p = 0,0014$ , высокая статистическая значимость). Для минимумов получено совпадение в 3-х из 10 лет (1934, 1955, 1960;  $p=0,055$ , не значимо). Еще два минимума не совпадают, но близки (1908 и 1947 гг. по реконструкции и 1909 и 1946 гг. по инструментальным данным).

Реконструкция особенно хорошо согласуется с инструментальными данными в годы с положительными аномалиями температуры. Все теплые пики представлены и имеют сопоставимые значения. Минимумы представлены хуже. Низкочастотные вариации инструментального ряда температуры хорошо воспроизводятся реконструкцией (рис. 5.2А), несмотря на различную структуру автокорреляции двух временных рядов: для инструментальных данных коэффициент автокорреляции (АК1) равен 0,31, а для реконструкции АК1 равен 0,55. Хорошее соответствие инструментальных и реконструированных временных рядов в первой трети XX в. повышает уверенность в достоверности инструментальных данных за этот период. Причинами этого соответствия могут быть большое пространственное покрытие древесно-кольцевыми данными и относительная пространственная однородность летней температуры на Огненной Земле.

Таблица 5.1.

Описание вложенных реконструкций. Жирным шрифтом показаны хронология и год, которые ограничивают каждую часть реконструкции на основе критерия  $EPS > 0,85$ . Статистика  $R^2$  рассчитана для максимального периода перекрытия между каждой частью реконструкции и инструментальным периодом.

Общий период использованных хронологий	Использованные хронологии (всего)	Корреляция с целевой переменной	$R^2$ на калибровке	$R^2$ на скользящем контроле	Минимальный год с $EPS > 0.85$	Период покрытый данной реконструкцией в итоговой реконструкции
1803-2002	CUC, GUA, KRS, KR4, <b>KR8</b> , MBR, PAR, PG, VAH, LRB (10)	0.790	0.624	0.498	1776, 1796, 1760, 1839, <b>1889</b> , 1759, 1854, 1766, 1844, 1600	1889-2002
1782-2002	CUC, GUA, KRS, KR4, MBR, <b>PAR</b> , PG, VAH, LRB (9)	0.771	0.595	0.482	1776, 1796, 1760, 1839, 1759, <b>1854</b> , 1766, 1844, 1600	1854-1888
1723-1985	BRI, <b>ESJ</b> , OBS, VAL, LRB, DP, DF2 (7)	0.706	0.498	0.373	1727, <b>1765</b> , 1716, 1751, 1600, 1754, 1755	1765-1853



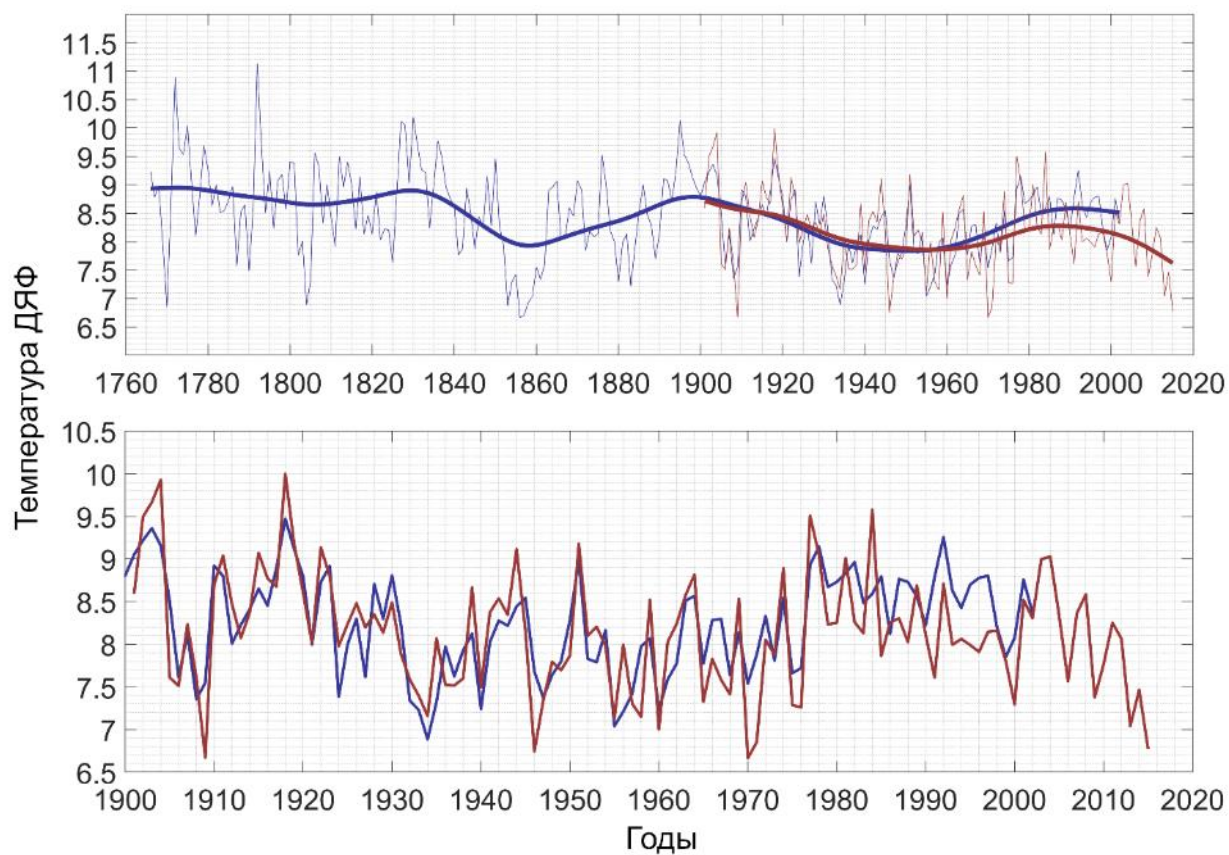


Рисунок 5.2 – Сравнение инструментальных (красный) и реконструированных (синий) температур декабря-февраля (ДЯФ) на Огненной Земле. А – Полный период. Б – Инструментальный период. Ряды, сглаженные 50-летним сплайном, показаны жирными линиями.

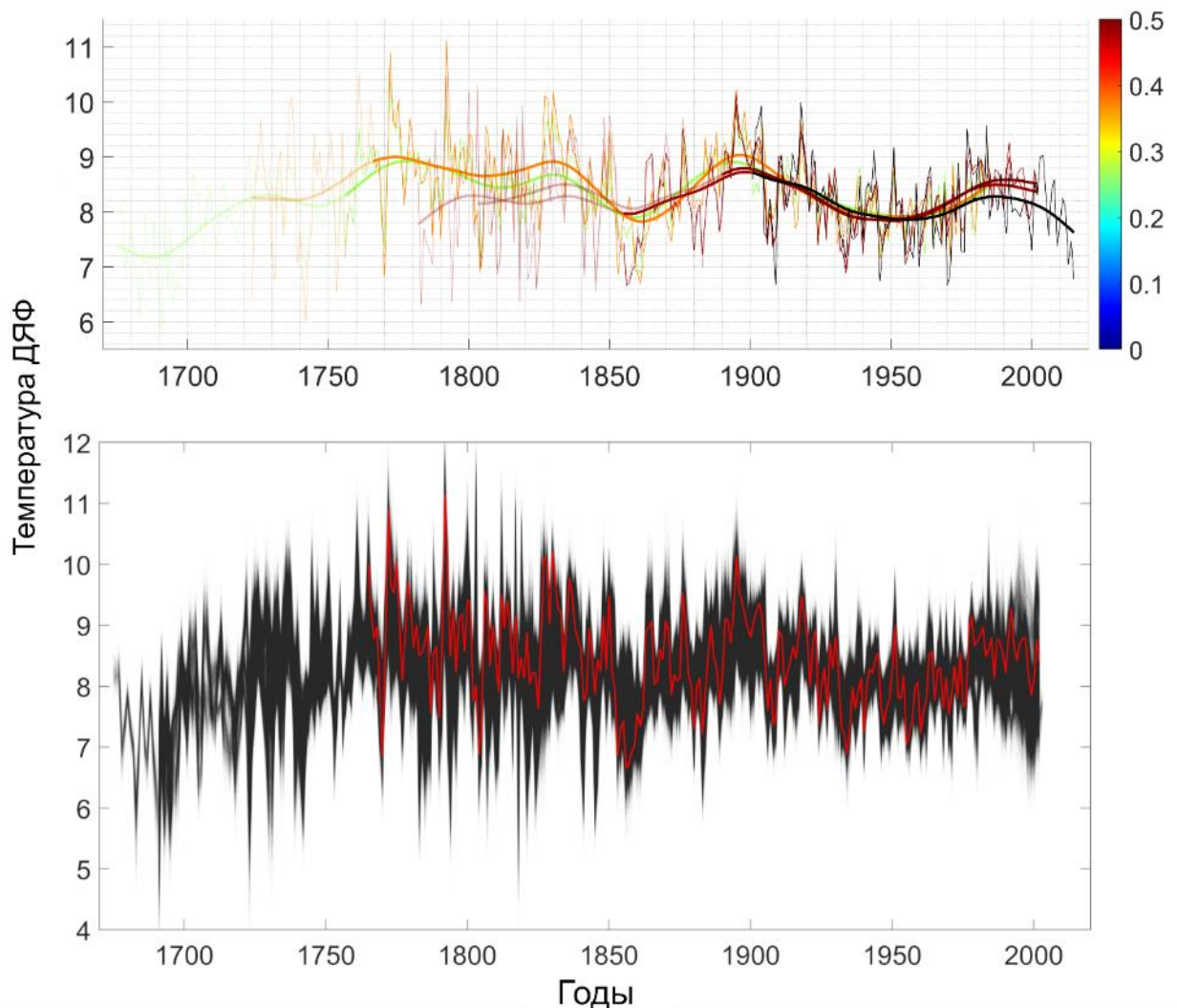


Рисунок 5.3: А – Отдельные реконструкции, которые были объединены для получения итоговой реконструкции. Инструментальные данные показаны черным цветом. Каждая реконструкция показана цветом, соответствующим объясненной дисперсии инструментальных данных (см. цветной масштаб справа). Части реконструкций, соответствующие значениям  $EPS < 0,85$ , показаны полупрозрачным. Четвертая реконструкция (зеленая, на основе хронологий BRI, VAL, LRB, DP и DF2) не вошла в окончательную реконструкцию, так как увеличивает общую продолжительность только на 10 лет, при этом имеет значительное более низкое качество (объясняет 28% дисперсии) по сравнению со следующей реконструкцией, объясняющей 37% дисперсии). Она показана, чтобы продемонстрировать степень ковариации реконструкций, основанных на разных наборах хронологий-предикторов. Б – Неопределенности, связанные с реконструкцией. Окончательная реконструкция показана красным; неопределенности показаны серой заливкой

Реконструкция указывает на более чем столетний теплый период между 1765 и 1905 гг. с короткими перерывами похолодания в 1800-х, 1850-х - начале 1860-х и 1880-х годах. Десятилетие 1853–1862 гг. было беспрецедентно холодным за более чем 250 лет реконструкции, но период 1932–1976 гг., охваченный инструментальными данными, был более продолжительным периодом с температурами ниже среднего.

Рисунок 5.3 дает возможность исследовать сходства и различия отдельных реконструкций (гнезд), а также неопределенности реконструкции. Даже те части, которые включают хронологии со значениями EPS ниже 0,85 и поэтому были исключены из окончательной реконструкции, находятся в хорошем согласии, особенно на протяжении всего XIX века. Этот факт повышает уверенность в реконструкции этого периода. Разброс среди реконструкций выше при переходе от 18-го к 19-ому веку (1780–1840). Для этого периода реконструкции, демонстрирующие более высокую объясненную дисперсию на инструментальном периоде, указывают на более низкие температуры. Однако эти «более холодные» реконструкции менее надежны из-за низкой повторности образцов и, следовательно, низких значений EPS. В то же время самая длинная реконструкция, показавшая самое низкое качество при верификации, показывает довольно хорошую согласованность с остальными реконструкциями, особенно на низких частотах. В целом, взаимное сравнение отдельных реконструкций подтверждает обоснованность применения подхода вложенных реконструкций, используемого в данном исследовании.

### **5.3.3 Колебания летней температуры на Огненной Земле и их причины**

Получив новую реконструкцию, хотелось бы подробнее понять причины колебаний летних температур на Огненной Земле. Если региональная изменчивость летней температуры тесно связана с основными модами атмосферных и океанических процессов Южного полушария, то реконструкция могла бы быть использована для получения некоторых выводов об изменчивости этих процессов в прошлом. Если же она обусловлена другими режимами атмосферной изменчивости, это позволило бы воспользоваться расхождениями между полученной реконструкцией и реконструкциями из близлежащих и отдаленных регионов для изучения особенностей региональной изменчивости. Приведенный ниже анализ направлен на разрешение данного вопроса.

Хотя климат южной части Южной Америки находится под сильным влиянием крупномасштабных атмосферных систем Южного полушария (Garreaud et al. 2009, 2013), было обнаружено, что инструментальные ряды летней температуры на Огненной Земле слабо связаны с основными индексами Южного полушария. Значимых корреляций не было обнаружено ни с летним АК ( $r = -0,10$ ,  $p = 0,3$ , 1901–2005 гг.;  $r = 0,01$ ,  $p = 0,94$ , 1957–2016 гг.), ни с летним ЭНЮК 3,4 ( $r = 0,08$ ,  $p = 0,39$ , 1901–2016 гг.).

В связи с этим, были исследованы особенности атмосферной циркуляции для лет с положительными и отрицательными месячными аномалиями температуры в течение лета в южном полушарии (декабрь-февраль) (рис. 5.4). Характер циркуляции при положительных температурных аномалиях более  $1^{\circ}\text{C}$  (рис. 5.4 А, Б, красные изолинии) показывает преобладание активного очага низкого давления к западу от Антарктического полуострова (наиболее ярко выраженного в декабре) и гребня высокого давления вблизи восточного побережья Патагонии, который в феврале простирается до самого Антарктического полуострова. Эта система усиливает меридиональную циркуляцию и способствует адвекции теплых северных воздушных масс на Огненную Землю. В годы с отрицательными аномалиями летней температуры более  $1^{\circ}\text{C}$  по модулю (рис. 5.4 А, Б, синие изолинии) преобладает циклоническая активность вблизи моря Уэдделла, которая, вероятно, усиливает западные ветры и приводит к юго-западной адвекции холодного воздуха на Огненную Землю. Эти два паттерна давления для положительных и отрицательных аномалий летних температур в южной части Южной Америки также обсуждались в работе (Alessandro 2008).

Согласно данным о средней скорости ветра за период 1901–2015 гг., летом на климат Огненной Земли влияет западный перенос (рис. 5.4 А-В). При сравнении карт барической топографии для лет с положительными и отрицательными температурными аномалиями видны значительные отличия (рис. 5.4 В). Если рассмотреть разность между высотой изобарической поверхности 1000 мб для лет с положительными и отрицательными температурными аномалиями, то можно заметить две области с положительной и отрицательной аномалиями: подобие «антициклона» в Южной Атлантике с центром между Мальвинскими островами и островом Южная Джорджия и «циклона» в южной части Тихого океана с центром, мигрирующим с севера на юг на долготе около  $100^{\circ}$  з.д. Эти процессы не являются действительными синоптическими процессами, а усреднением

аномалий давления за многие годы. Однако описанный атмосферный диполь хорошо объясняет изменчивость летних температур на Огненной Земле: корреляции региональных месячных температур с высотой изобарической поверхности 850 мб достигают  $r = 0,73$  ( $p < 0,001$ ) в центре указанного «антициклона» и имеют значимые отрицательные значения (до  $r = -0,4$ ,  $p < 0,001$ ) в «циклоне» (рис. 5.5 В). Векторы скорости ветра показывают, что при положительных аномалиях температуры интенсивность и повторяемость северных ветров на Огненной Земле возрастают (рис. 5.5 А, В). Описанная дипольная система является более интенсивной в декабре и феврале, чем в январе, а также имеется различие в положении отрицательных аномалий давления для разных месяцев (рис. 5.5).

Поля геопотенциальной высоты изобарических поверхностей и аномалий силы ветра для положительных аномалий температуры более  $1^{\circ}\text{C}$  (рис. 5.5 А) подтверждают, что в декабре и январе центр давления, обуславливающий положительные аномалии температуры, является частью квазистационарного волнового процесса с квази-баротропной структурой, простирающегося от Австралии через южную часть Тихого океана и заканчивающегося центром циклонической циркуляции в Южноатлантической зоне конвергенции (ЮАЗК). В феврале волна в меньшей степени простирается на запад, распространяясь на окрестности южной части Южной Америки и Антарктического полуострова. Отрицательные аномалии температуры на Огненной Земле связаны с аномалиями высоты изобарической поверхности обратного знака (рис. 5.5 Б). Над южной частью Атлантического океана расположен центр отрицательной аномалии давления, усиливающий южную циркуляцию над Огненной Землей. Этот центр также является частью волны, протянувшейся вдоль Тихого океана и заканчивающейся в ЮАЗК. Во все летние месяцы она вытягивается зонально в сторону Индийского океана.

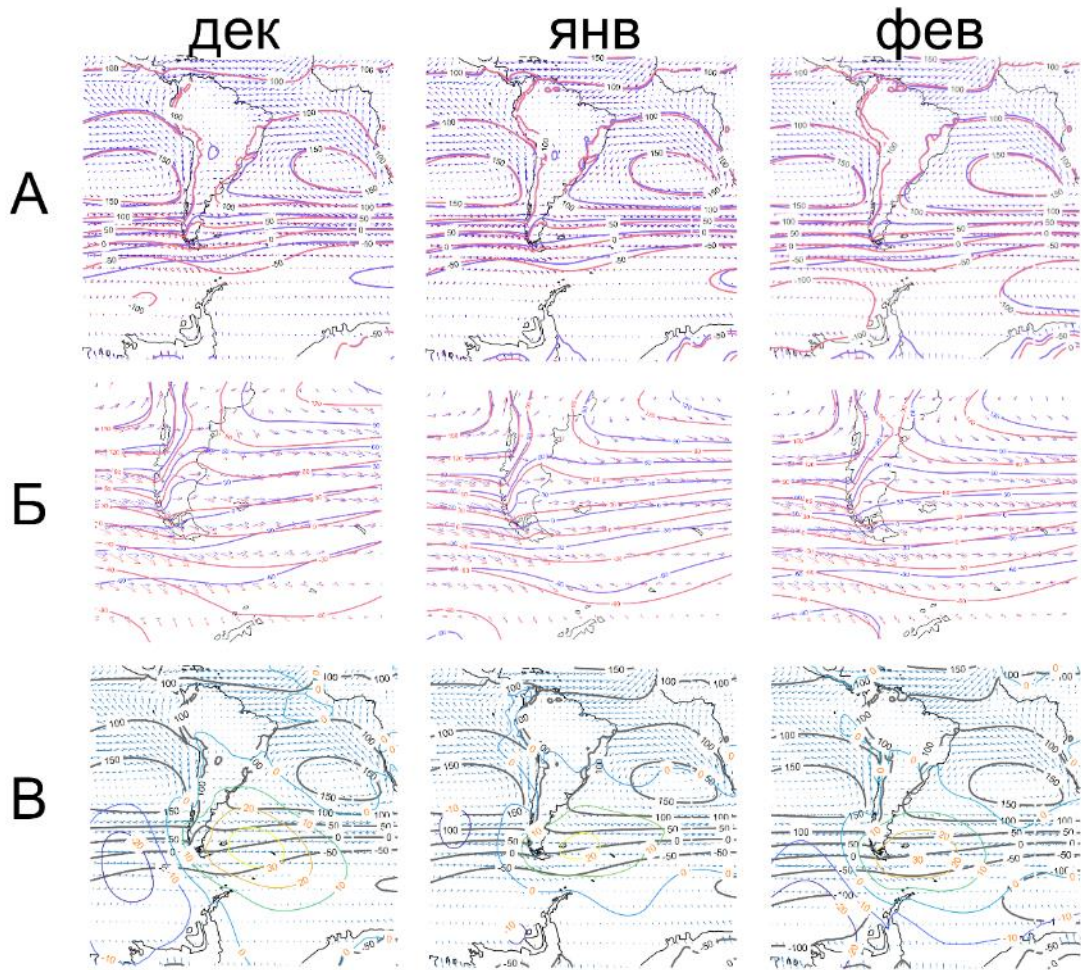


Рисунок 5.4 – Метеорологические процессы, влияющие на летнюю температуру на Огненной Земле за период 1901–2015 гг. А – Карты барической топографии для изобарической поверхности 1000 мб. для положительных (красный цвет) и отрицательных (голубой цвет) аномалий летней температуры на Огненной Земле за период с 1901 по 2015 год (по данным реанализа 20th Century Reanalysis V3): линии – геопотенциальная высота изобарической поверхности, стрелки – скорость и направление ветра. Б – то же, что на панели А, но с увеличением масштаба. В – Серые изолинии показывают среднюю геопотенциальную высоту изобарической поверхности. Цветными изолиниями показаны разности геопотенциальной высоты изобарической поверхности 1000 мб для лет с положительными и отрицательными температурными аномалиями. Синие стрелки показывают скорость ветра на уровне 1000 мб.

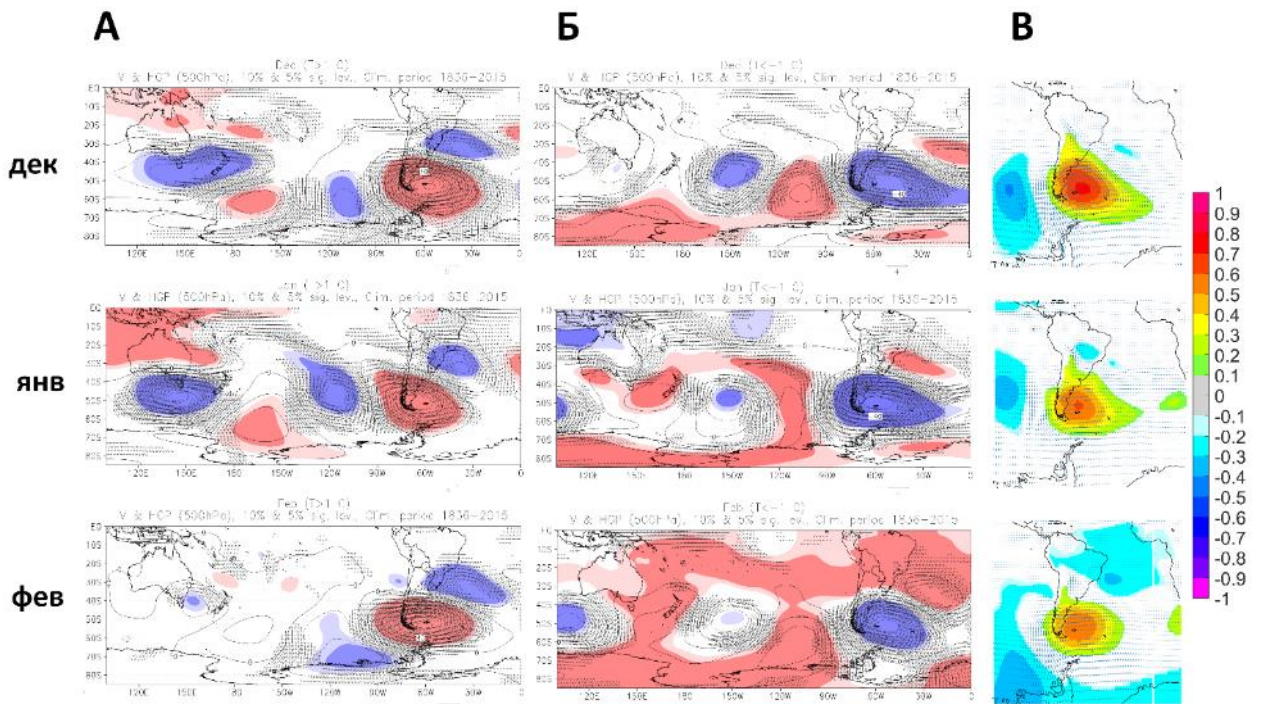


Рисунок 5.5 – А – Поля аномалий геопотенциальной высоты и скорости ветра за годы с аномалиями температуры  $> 1^\circ\text{C}$  на Огненной Земле, соответствующие декабрю (вверху), январю (в центре) и февралю (внизу) на изобарической поверхности 500 мб. Заштрихованные области соответствуют статистически значимым аномалиям на уровнях ( $p < 0,1$ ) (светлая заливка) и ( $p < 0,05$ ) (темная заливка). Положительные значения показаны красным цветом, отрицательные – синим цветом. Показаны только векторы ветра, где хотя бы одна компонента,  $u$  или  $v$ , является значимой на уровне ( $p < 0,05$ ). Б – То же что на А, но для температурных аномалий  $< -1^\circ\text{C}$ . В – Коэффициенты корреляции между температурой на Огненной Земле и геопотенциальной высотой изобарической поверхности 850 мб. Показаны только значимые значения ( $p < 0,05$ ). Синими стрелками показаны разности скоростей ветра на уровне 850 мб в годы с положительными и отрицательными аномалиями температуры.

На основании приведенных результатов можно утверждать, что региональные колебания крупномасштабных барических систем, формирующихся на пути субполярных западных ветров Южного полушария, влияют на изменчивость летней температуры на Огненной Земле. Знак и интенсивность летних температурных аномалий зависят от наличия и интенсивности атмосферного диполя и траекторий циклонов в Южной Атлантике и

южной части Тихого океана. В следующем разделе эти результаты будут обсуждаться в контексте интерпретации полученной реконструкции.

## **5.4 Обсуждение результатов**

### **5.4.1 Региональные и полушарные факторы, влияющие на изменчивость летних температур на Огненной Земле**

Согласно полученным результатам, прямое влияние крупномасштабных атмосферных колебаний (АК и ЭНЮК) на летнюю температуру на Огненной Земле ограничено. Эти результаты согласуются с предыдущими работами (Soto-Rogel and Aravena 2017; Fuentes et al. 2019) и подчеркивают важность мезомасштабных атмосферных процессов и процессов синоптического масштабов в регионе. На данном этапе неясно, можно ли обнаружить сопутствующие эффекты АК и ЭНЮК (Fogt and Bromwich 2006) в изучаемом районе для приземных летних температур на более длительных временных масштабах, как указано в (Dätwyler et al. 2020).

Известно, что конфигурация барического поля в основных центрах действия, таких как район морей Росса и Беллинсгаузена и моря Уэдделла, имеет значение для модуляции адвекции над южной частью Южной Америки. Жак-Копер с соавторами (Jacques-Copere et al. 2016) указывали, что летние волны тепла в Патагонии ( $46-52^{\circ}$  ю.ш., проанализирован 201 случай) обычно формируются в то время, когда в Атлантическом океане присутствует антициклон у восточного побережья Патагонии, вызывающий адвекцию тепла с севера. Авторы показали, что этот антициклон начинает формироваться у западного побережья Огненной Земли и продвигается дальше на северо-восток. Анализируя поля геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 мб авторы заметили, что этот центр высокого давления формируется внутри крупномасштабной бароклинной волновой системы над южной частью Тихого океана. Этот процесс начинается с образования аномалии низкого давления у юго-восточного побережья Австралии и развивается в течение 21 дня через всю южную часть Тихого океана. Диполь давления, связанный с аномалиями летней температуры на Огненной Земле (рис. 5.4 В), является частью аналогичной крупномасштабной волны давления (рис. 5.5 А, Б).



Р. Гарро и соавторы (Garreaud et al. 2013) указывали, что усиление западного переноса приводит к более прохладному лету в южной части Южной Америки. Кроме того, Алессандро (Alessandro 2008) показала, что отрицательные аномалии летней температуры возникают на Огненной Земле, когда ложбина на уровне 500 мб располагается над Антарктическим полуостровом или перемещается на восток с центром над морем Уэдделла, вызывая адвекцию холодного воздуха с юго-запада. Положительные аномалии летней температуры на Огненной Земле, по-видимому, являются следствием аномалии высокого давления, расположенной к востоку от Патагонии, которая соответствует гребню изобарической поверхности в этом районе на больших геопотенциальных высотах. Поскольку аномалии температуры на Огненной Земле связаны с вариациями траекторий циклонов в южной части Тихого океана и Южной Атлантике, отрицательные аномалии температуры возникают тогда, когда траектории циклонов перемещаются на север, усиливая циклоническую активность к юго-востоку от Огненной Земли.

В нескольких работах (Jacques-Coper and Brönnimann 2014; Jacques-Coper and Garreaud 2015) выявлено резкое изменение климата Южной Америки с конца 1970-х гг., когда произошло усиление атлантического субтропического антициклона и зона западного переноса сместилась на юг. Эти процессы, вероятно, вызвали расходящиеся тренды зимних и летних температур в Южной Патагонии после 1980 г., что хорошо видно по данным наблюдений (рис. П5.4). Отрицательный тренд летней температуры на Огненной Земле с начала 1980-х годов также отличается от положительного тренда летней температуры Южной Америки и Южного полушария в течение того же периода. Указанное климатическое изменение также заметно в рядах инструментальных наблюдений температуры декабря-февраля как значительное повышение с 1976 по 1977 год. Полученная реконструкция хорошо отражает этот сдвиг; однако она недооценивает последующую тенденцию к снижению летних температур в период до 2000 г. Снижение качества реконструкции с 1970-х гг., вероятно, вызвано снижением климатической чувствительности деревьев в этот период (глава 4). Одной из возможных причин снижения климатической чувствительности деревьев может являться указанный климатический сдвиг конца 1970-х гг.

#### 5.4.2 Регрессия методом частных наименьших квадратов как замена регрессии на главные компоненты в дендроклиматических реконструкциях

Полный набор данных, использованных для реконструкции, включает хронологии двух видов деревьев (*N. pumilio* и *N. betuloides*), произрастающих в разных условиях, включая высоту над уровнем моря, экспозицию, почвы и т. д. Согласно предыдущим исследованиям, у этих видов на Огненной Земле наблюдаются различия в климатическом отклике: у *N. pumilio* отклик на температуру смещен к концу весны - началу лета (ноябрь, декабрь), а у *N. betuloides* – к концу лета - началу осени (январь, февраль, март) (Massaccesi et al. 2008; Fuentes et al. 2019; Matskovsky et al. 2019). Наилучшее качество реконструкции было получено для наборов предикторов, включающих оба вида деревьев, что указывает на способность использованного метода реконструкции извлекать информацию о разных периодах летнего сезона из хронологий разных видов деревьев. Примечательно, что значения  $R^2$  достигающие 0,5 на скользящем контроле были получены для набора предикторов, ни один из которых не показывает корреляции с целевой переменной выше  $r = 0,38$ , а некоторые имеют отрицательную корреляцию.

Стабильность дендроклиматических связей является еще одной проблемой при реконструкции климата прошлого, особенно когда используются сложные зависимости, включающие множество предикторов. В нашем случае сходство реконструкций, построенных по разным наборам хронологий (рис. 5.3А), включая их низкочастотную изменчивость, является косвенным подтверждением устойчивости обнаруженных связей. Другим подтверждением является то, что все частные реконструкции показали положительные значения  $R^2$  на данных, не использованных для калибровки (таблица 5.1).

Что касается методов извлечения климатической информации из годовых колец, то здесь были рассмотрены два из них — РГК и РЧНК. Так как РЧНК строит скрытые переменные для максимизации объясненной дисперсии в целевой переменной, это ее свойство представляется особенно целесообразным в случае дендроклиматических реконструкций, основанных на большом числе хронологий-предикторов, поскольку позволяет извлекать общую информацию, относящуюся к целевой климатической переменной, из набора хронологий, а не концентрировать общий сигнал набора хронологий, как в случае РГК. Кроме того, РЧНК обычно требует меньшего количества скрытых переменных для достижения того же уровня объясненной дисперсии. Говоря в

дендроклиматических терминах, мы можем считать РЧНК лучшим фильтром, отделяющим сигнал от шума. Под термином «сигнал» здесь мы понимается именно целевая климатическая переменная, а не общая изменчивость древесно-кольцевых хронологий. В случае РЧНК сигнал сохраняется в нескольких первых скрытых переменных, а шум распределяется по остальным. Лучшее отделение сигнала от шума с помощью РЧНК подтверждается более высокой статистикой верификации по сравнению с РГК (рис. П5.1).

Как видно из представленных результатов (раздел 5.3.1, рис. П5.3), в случае РГК важная информация о целевой переменной содержалась не первых в главных компонентах, а в компонентах более низкого порядка. Наоборот, в случае РЧНК объясняемая дисперсия быстро увеличивалась для первых скрытых переменных, а затем рост замедлялся. Такое свойство РЧНК позволяет легко зафиксировать необходимое количество скрытых переменных, что особенно важно для автоматизированной обработки больших наборов данных, например, при использовании метода PPR.

В приведенном примере метод РЧНК извлек климатическую информацию из набора древесно-кольцевых предикторов лучше, чем РГК. Объяснение этого результата может быть следующим: некоторые деревья, растущие в специфичных условиях, благодаря специфике произрастания фиксируют важную информацию о климатической изменчивости, не фиксируемую деревьями из других местообитаний. Метод РГК, который концентрирует общую информацию из всех древесно-кольцевых предикторов, сдвигает важную информацию о климатическом сигнале из специфичных местообитаний в компоненты более низкого порядка. Следовательно, итоговая реконструкция может потерять эту информацию, если эти компоненты низкого порядка будут исключены на одном из этапов анализа (обычно выбирается некоторое небольшое подмножество всех компонент). Кроме того, различные процедуры скрининга, направленные на уменьшение количества используемых хронологий-предикторов, также могут привести к потере важного климатического сигнала при построении реконструкции. В автоматизированных процедурах, при применении которых тщательный отбор предикторов невозможен, РЧНК может показать улучшение по сравнению с РГК, используя в то же время меньшее число скрытых переменных. Подводя итог, можно утверждать, что полученные результаты показывают преимущества замены РГК на РЧНК в автоматизированных процедурах, таких как PPR. Тем не менее, необходимо заметить, что представленные эксперименты

проводились для одного региона и одного набора данных, и для подтверждения этого вывода требуются дополнительные исследования для других регионов и пород деревьев.

### **5.4.3 Сравнение с другими региональными реконструкциями температуры и долгопериодная изменчивость в них**

Было проведено сравнение полученной реконструкции летней температуры для Огненной Земли с другими реконструкциями температуры для Огненной Земли и Южной Патагонии. Это сравнение необходимо для того, чтобы поместить полученную реконструкцию в палеоклиматический контекст региона и определить ее наиболее достоверные периоды и временные рамки. В данной работе был использован и обновлен набор, включающий многие из существующих ДКХ для Огненной Земли. Поэтому определенные сходства между наборами данных, использованных в этом и предыдущих исследованиях, неизбежны. 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. 5.6, таблица 5.2). 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). Все реконструкции, кроме B89, построены для регионов, отличных от региона данного исследования, в то время как ДКХ, использованные для B89 получены из того же региона, что и представленная реконструкция, и во многом два набора данных пересекаются. Все реконструкции, кроме N11, имеют отличные целевые переменные от целевой переменной представленной реконструкции. Чтобы изучить различия в целевых переменных, инструментальные ряды температур для разных сезонов и различных регионов были нанесены на общий график (рис. П5.4). 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. 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.

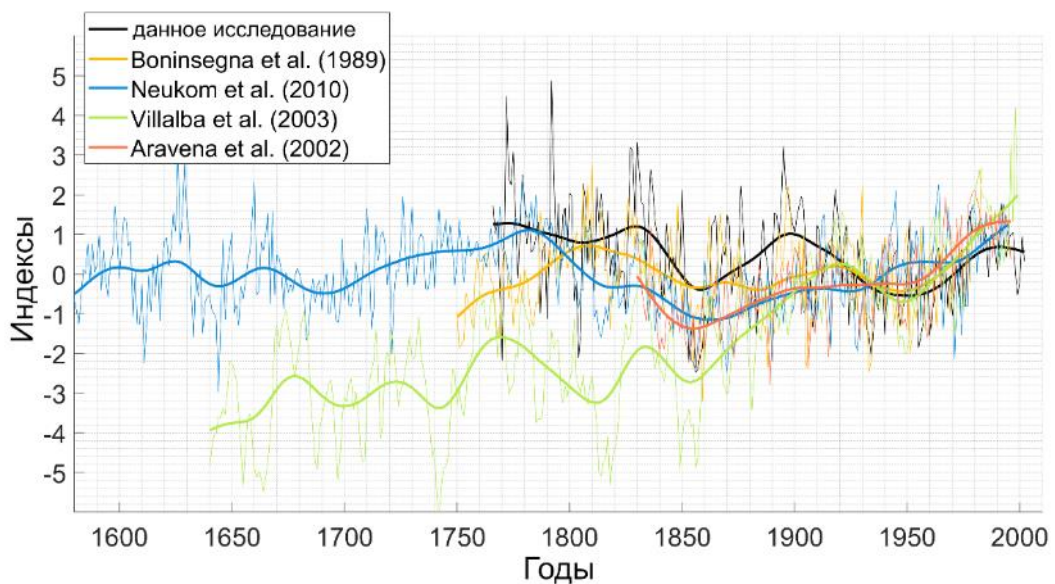


Рисунок 5.6 – Сравнение различных реконструкций температуры для Огненной Земли и Южной Патагонии. Все реконструкции нормированы за период 1901-1983 гг. Тонкие линии — годовые значения, жирные линии — 50-летние сглаживающие сплайны.

Для оценки количественного сходства сравниваемых реконструкций были рассчитаны коэффициенты корреляции между этими реконструкциями для общего периода 1830–1983 гг. (табл. 5.2). Полученная реконструкция имеет наибольшую корреляцию с A02 ( $r = 0,38$ ). Чтобы сравнить реконструкции на более высоких частотах и исключить влияние долгосрочных трендов, которые, в том числе, могут ошибочно возникать в результате различных подходов к обработке исходных данных, также были рассчитаны корреляции между реконструкциями без тренда (линейный тренд был удален методом наименьших квадратов). Корреляции с реконструкциями без тренда увеличиваются, достигая самых высоких значений  $r = 0,58$  и  $r = 0,42$  для A02 и V03 соответственно. Ряды с удаленным

трендом были рассмотрены отдельно, так как некоторые реконструкции, основанные на древесно-кольцевых данных, могут приобретать ложные тренды, связанные с процессом стандартизации (Briffa and Melvin 2011). Например, реконструкция V03 может содержать ложный тренд, возникающий из-за систематической ошибки, названной «Современная выборка» (Modern Sample bias, Briffa and Melvin (2011), см. рис. 5.6 в этой статье, а также раздел 1.3.3) из-за применения метода стандартизации региональной кривой роста (RCS) к выборке, состоящей исключительно из живых деревьев, без включения ранее умерших деревьев. Без этого тренда, вполне вероятно являющегося искусственным, V03 гораздо лучше соответствовала бы реконструкции, представленной в данной главе.

Таблица 5.2.

Коэффициенты корреляции различных температурных реконструкций для Огненной Земли и Южной Патагонии за общий период 1830–1983 гг. Значения выше диагонали были рассчитаны для исходных реконструкций, значения ниже диагонали – для реконструкций с убраным линейным трендом.

Данное исследование температура декабря-февраля на Огненной Земле		B89 температура ноября-декабря Ушуайя	N11 температура декабря-февраля Юж. Патагония	V03 Юж. сектор Юж. Анд, средне-годовые температуры	A02 Tmin годовая Пунта-Аренас
Данное исследование	1	0.33	0.10	0.21	0.38
B89	0.36	1	0.12	0.21	0.21
N11	0.20	0.08	1	0.49	0.48
V03	0.42	0.18	0.33	1	0.53
A02	0.58	0.18	0.34	0.32	1

Реконструкции N11, V03 и A02 показали высокие значения попарных коэффициентов корреляции (в пределах от 0,48 до 0,53, табл. 5.2), 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. Реконструированные колебания температуры на периодах до 200–250 лет должны быть достоверными, так как средняя длина использованных древесно-кольцевых серий превышает 200 лет. 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. 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.

## 5.5 Выводы к главе 5

- 1) Построена новая реконструкция летней температуры для Огненной Земли, охватывающая период 1765–2002 гг. и объясняющая от 37 до 50% изменчивости инструментального ряда температуры. Представленная реконструкция является новым свидетельством о климате прошлого в регионе, где реконструкции высокого разрешения единичны. Полученная реконструкция обладает весьма высокими показателями качества, особенно с учетом в целом умеренного климатического сигнала, содержащегося в ширине годовых колец в данном регионе.
- 2) Изменчивость летней температуры на Огненной Земле в основном обусловлена колебаниями систем атмосферного давления как в Южной Атлантике, так и в южной части Тихого океана вблизи Огненной Земли. В то же время она незначительно коррелирует с основными полушарными индексами: АК и ЭНЮК. Следовательно, новая реконструкция выявляет внутреннюю региональную изменчивость, что подчеркивает ее значимость для экспериментов по моделированию климата. Полученную реконструкцию можно использовать для прямого сравнения с выходными данными модели, а также для крупномасштабных реконструкций на основе усвоения палеоклиматических данных.
- 3) При сравнении двух методов реконструкции, РЧНК продемонстрировал лучшие результаты по сравнению с РГК в случае нескольких древесно-кольцевых предикторов без предварительного скрининга. В соответствии с этими результатами, РЧНК может быть предпочтительнее РГК для использования в автоматизированных процедурах реконструкции, таких как широко используемая поточечная регрессия (PPR).
- 4) Сравнение полученной реконструкции с другими температурными реконструкциями для Огненной Земли и соседних регионов показало наличие долгопериодной изменчивости в ней, а именно значимого отрицательного тренда за весь период реконструкции. Кроме того, отрицательный тренд присутствует и в другом показателе реконструкции – дисперсии в скользящем окне.



## **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 данной главе 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.

### **6.1 Материалы и методы**

На данный момент все крупномасштабные атласы засушливости, основанные на древесно-кольцевых данных (Cook et al. 1999, 2010, 2015; Palmer et al. 2015; Stahle et al. 2016; Morales et al. 2020), построены по сходной методике, хотя она и претерпевает некоторые изменения от атласа к атласу. Основой методики является метод поточечной регрессии, *point-by-point regression*, PPR. В данном разделе описана методика, использованная для построения последнего из появившихся атласов - Атласа засух Европейской России, *European Russia Drought Atlas, ERDA* (Cook et al. 2020). Ее описание необходимо для понимания того, какого рода временные ряды будут исследованы в данной главе.

#### **6.1.1 Используемые наборы климатических данных**

Данные по самокалибрующемуся индексу суровости засухи Палмера (*self-calibrated Palmer Drought Severity Index, scPDSI*), используемые здесь в качестве целевой переменной

для реконструкции, основаны на сеточных данных CRU TS 3.25 о температуре и осадках (Osborn et al. 2016, разрешение 0,5°). Они охватывает период 1901–2016 гг. Подробное описание методики расчета значений индекса см. на веб-странице <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/>.

### 6.1.2 Древесно-кольцевые данные

На рис. 6.1 показано пространственное распределение древесно-кольцевых хронологий, использованных при разработке ERDA, всего 697 хронологий, многие из которых были построены специально для этого атласа.

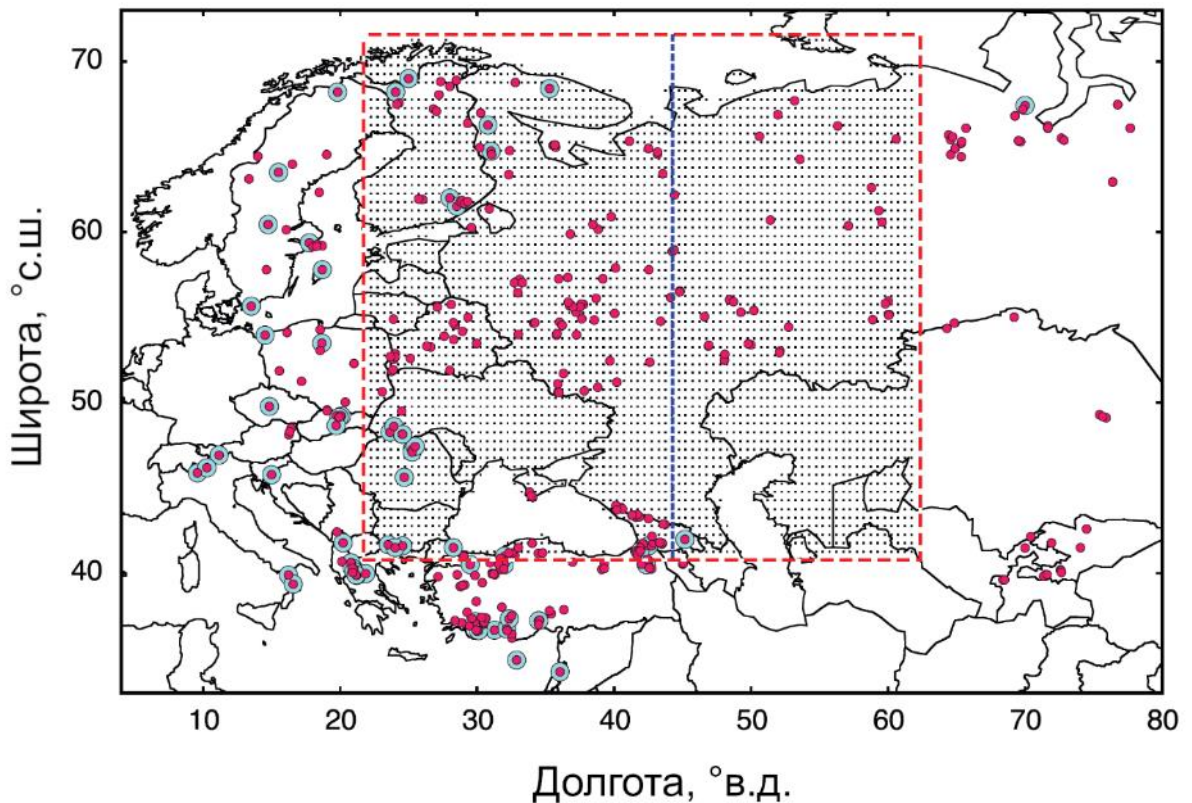


Рисунок 6.1 – Карта-схема расположения хронологий, использованных для построения Атласа засух Европейской России ERDA. Область Атласа выделена красным пунктирным прямоугольником: всего 4259 точек. Сеть древесно-кольцевых хронологий, используемая в ERDA, показана маленькими красными точками, а сеть, использованная в Атласе засух Старого Света (Old World Drought Atlas, OWDA) – большими синими точками. Вертикальная синяя пунктирная линия — западная граница OWDA.

Только на территории Европейской части России сеть увеличилась с четырех хронологий, использованных в OWDA, до 275 хронологий, использованных в ERDA. В них входят ДКХ восьми видов деревьев: *Pinus sylvestris* L. (156 серий), *Larix sibirica* Ledeb. (39 серий), *Picea obovata* Ledeb. (33 ряд), *Picea abies* (L.) H. Karst. (32 серии), *Quercus robur* L. (9 серий), *Abies nordmanniana* (Stev.) Spach (3 серии), *Fagus orientalis* Lipsky (2 серии), *Pinus halepensis* Mill. (1 серия).

В последние годы были предприняты активные усилия по отбору образцов в районах, расположенных южнее таежных регионов, в более жарких и засушливых частях европейской части России, где сеть ДКХ исторически была очень редкой. Мацковский (Matskovsky 2016) проанализировал климатический отклик в ширине годичных колец для наиболее распространенных видов, произрастающих на всей Восточно-Европейской равнине, и пришел к выводу, что зона 55-60° с.ш., является примерной границей между чувствительными к температуре и засухе экземплярами хвойных деревьев. Таким образом, развитие сети ДКХ на европейской части России к югу от 60° с.ш. имело особое значение для построения атласа ERDA. С этой целью Соломина и соавторы (2017) построили 59 новых ДКХ. Также большой коллектив авторов статьи (Cook et al. 2020) предоставил хронологии для данного проекта. Весьма важным было построение и предоставление 23 новых хронологий *P. sylvestris* и *Q. robur* из Беларуси М. Ермохиным, так как в атласе OWDA это число равнялось нулю.

На Европейской территории России древесина традиционно широко использовалась для строительства, отопления и других целей. Леса также активно вырубались для ведения сельского хозяйства. Все это, а также климатические условия, способствующие быстрому разложению древесины, обуславливают сложность поиска материала для построения длинных ДКХ. После знаменитой новгородской хронологии (Колчин 1963) построено лишь несколько сводных хронологий, основанных на археологических, архитектурных и современных (живых) образцах древесины, охватывающих значительную часть прошлого тысячелетия (Кулакова, 2009; Тарабардина, 2009; Соломина и др., 2011; Карпухин, Мацковский 2014; Соломина и др., 2017; Solomina and Matskovsky 2021). Нехватка древнего древесно-кольцевого материала на большей части пространственного домена Атласа ограничивает временное покрытие ERDA периодом 1400-2016 гг. Набор ДКД для территории Европейской части России, использованный для построения Атласа, был

отдельно описан в работе (Solomina et al. 2022) и выложен в открытый доступ в международный банк древесно-кольцевых данных ITRDB.

### **6.1.3 Стандартизация древесно-кольцевых данных**

Все 697 древесно-кольцевых хронологий, использованных для реконструкции, были стандартизированы (*sensu* Fritts 1976) относительно единообразно с использованием современных методов стандартизации ДКД, основанных на удалении тренда методом SF (Melvin and Briffa 2008), и нацеленных на максимальное сохранение изменчивости на периодах до 100 лет. Для оценки возрастного тренда использовался сплайн с изменяемой гибкостью (Melvin et al. 2007). Перед удалением тренда к необработанным измерениям ширины колец была применена адаптивная степенная трансформация для выравнивания дисперсии. Это позволило рассчитать индексы годовых колец с помощью вычитания возрастного тренда, а не деления на него, что приводит к уменьшению вероятности систематических ошибок при расчете индексов хронологий годовых колец (Cook and Peters 1997). Комбинация использованных методов сводит к минимуму потерю общей (климатической) изменчивости из-за известного «проклятия длины сегмента» (Cook et al. 1995) (см. главу 1), но все же не позволяет сохранять долгопериодную изменчивость в том объеме, в каком это возможно при использовании метода RCS. В отличие от температурных реконструкций, для реконструкций засушливости на основе ДКД часто используют хронологии, не несущие долгопериодной изменчивости, но с выраженной изменчивостью на межгодовых и декадных масштабах. В данной главе подобное свойство использованных хронологий является преимуществом, так как позволяет изучить возможность получения долгопериодной информации из дополнительных характеристик временных рядов, не несущих такой информации в своих спектральных характеристиках.

### **6.1.4 Ансамблевая поточечная регрессия**

В качестве основного метода реконструкции для построения ERDA использовалась ансамблевая поточечная регрессия (Ensemble point-by-point regression, EPPR). EPPR представляет собой обобщение метода поточечной регрессии (PPR), используемого для пространственных реконструкций климата, впервые предложенного в работе (Cook et al. 1999) для реконструкции пространственных закономерностей засушливости по ДКД. Первоначально разработанный метод PPR использовал порог корреляции (например,

уровень значимости 90%) для выбора древесно-кольцевых предикторов из общего набора хронологий-кандидатов, попадающих в заданный радиус поиска для каждой точки сети пространственной реконструкции. Этот жесткий пороговый метод принятия или отклонения предикторов-кандидатов (аналогичный указанию априорного уровня F-статистики для ввода переменных в классической пошаговой регрессии) может очень хорошо работать на практике. Но в этом случае может быть потеряна полезная информация о климате, так как отбрасываются предикторы, которые не соответствуют выбранному порогу значимости корреляции, даже если это несоответствие незначительно. Вместо использования бинарного порога для выбора предикторов в усовершенствованном методе EPPR используется ковариация между ДКХ-предикторами и целевой климатической переменной. В регрессионной модели все хронологии-предикторы используются с весами, зависящими от степени их корреляции с реконструируемой климатической переменной (например, (Cook et al. 2013, 2015)). Это выражается как

$$wTR = uTR * r^p \quad (6.1)$$

где  $uTR$  — исходная древесно-кольцевая хронология, нормированная за период калибровки,  $r$  — модуль коэффициента корреляции с реконструируемой климатической переменной на периоде калибровки,  $p$  — параметр возведения в степень, примененный к  $r$ , а  $wTR$  — результирующая взвешенная хронология. Этот метод взвешивания преобразует корреляционную матрицу предикторов годовых колец деревьев в ковариационную матрицу, которая усиливает влияние древесно-кольцевых предикторов с большими весами (лучше коррелированных с климатом). Затем на каждом шаге EPPR, то есть для каждой точки пространственной сетки, проводится процедура регрессии на главные компоненты (РГК), с использованием полученной корреляционно-взвешенной ковариационной матрицы.

Поскольку не существует теоретических оценок для значения степенного показателя, используемого в формуле (6.1), предлагается использовать диапазон из восьми значений: {0; 0,1; 0,25; 0,5; 0,67; 1,0; 1,5; 2,0} для каждой точки. Функциональные формы этих

корреляционных весов показаны на рис. Пб.1. Эти преобразования являются монотонными, непрерывными и охватывают весь диапазон весовых коэффициентов в зависимости от  $\gamma$  и выбранного  $\rho$ . Когда  $\rho = 0$ ,  $w_{TR} = u_{TR}$ .  $\rho = 1,0$  указывает на линейное взвешивание по коэффициенту корреляции, а  $\rho = 2,0$  приводит к взвешиванию по квадрату корреляции. Оба этих значения имеют интуитивно понятные интерпретации взаимосвязей между переменными, а простое взвешивание по коэффициенту корреляции ( $\rho = 1,0$ ) ранее использовалось в нескольких климатических реконструкциях (например, Smerdon et al. 2015; Tierney et al. 2015). Далее метод главных компонент применяется к каждой корреляционно-взвешенной ковариационной матрице для получения набора коэффициентов главных компонент для их использования в качестве предикторов в уравнении регрессии. Таким образом, в методе EPPR создается ансамбль реконструкций из 8 элементов на каждый радиус поиска (по числу использованных значений степени), члены которого можно сравнить и объединить в реконструкцию на основе среднего значения для ансамбля. Для ERDA был использован ансамбль реконструкций из 16 членов, по восемь для двух радиусов поиска предикторов: 500 и 1000 км вокруг каждой точки сетки. Радиус поиска 500 км приблизительно соответствует расстоянию затухания корреляции ( $1/e$ ) для осадков, которые доминируют в оценке значений scPDSI. Радиус поиска 1000 км учитывает относительно разреженное и неравномерное распределение использованной сети ДКХ относительно регулярной сетки scPDSI (рис. 6.1).

Статистика калибровки и валидации рассчитывается для среднего значения ансамбля. Также рассчитывается показатель разброса - средняя корреляция (RBAR) между элементами ансамбля в каждой точке сетки (рис. 6.2). Карта RBAR является полезным диагностическим средством для иллюстрации стохастической природы метода EPPR. Она также иллюстрирует тот факт, что не существует однозначно оптимального решения для реконструкции пространственных климатических полей с использованием метода EPPR. Используемый здесь метод EPPR идентичен тому, который использовался при создании атласа OWDA (Cook et al. 2015), что делает возможным прямое сравнение показателей калибровки и верификации между двумя атласами засухи для их области перекрытия, показанной на рис. 6.1.

### 6.1.5 Калибровка и верификация реконструкции

Инструментальные данные scPDSI, используемые для калибровки и верификации, охватывают период 1901–2016 гг. Общий последний год использованного набора ДКХ – 1983-й, что вызвано различным временем отбора образцов из живых деревьев. По этой причине для построения реконструкций был выбран калибровочный период 1931–1983 гг. Остальные данные scPDSI за 1901–1930 гг. не использовались при калибровке, а исключительно для верификации. Подобный способ разделения общего периода на периоды калибровки и верификации описан в книге (Fritts 1976) и успешно использовался при разработке всех предыдущих атласов засухи, начиная с первого (Cook et al. 1999). Статистика для периода калибровки, использованная в данном исследовании, представляет собой коэффициент детерминации ( $R^2$  или CRSQ) и коэффициент детерминации на скользящем контроле leave-one-out (CVRE). В случаях плохой калибровки значения CVRE могут быть отрицательными, что невозможно для показателя CRSQ. Статистика верификации, использованная для Атласа ERDA, представляет собой квадрат корреляции Пирсона (VRSQ), коэффициент уменьшения ошибки (VRE) и коэффициент эффективности (VCE). Когда VRSQ, VRE и VCE положительны, они представляют собой разные меры качества модели, выраженные в единицах объясненной дисперсии за период верификации. Отрицательные значения указывают на отсутствие прогностической способности построенной модели реконструкции. Кроме того, формулы этих статистик данных предполагают, что значения  $VRSQ \geq VRE \geq VCE$  при расчете на основе одних и тех же данных, что делает коэффициент VCE наиболее жесткой статистикой верификации. См. работы (Cook et al. 1994, 1999) для подробного описания этих статистик.

### 6.1.6 Сглаживание пространственной реконструкции

Для построения Атласа ERDA впервые было использовано пространственное сглаживание данных, а именно сглаживание по типу ферзя (Queens case imputation and smoothing, QCIS). Далее обосновывается использование данного метода и цели его разработки. Поскольку метод EPPR работает независимо с каждой точкой пространственной сетки, а число доступных хронологий-предикторов убывает при движении в прошлое, реконструкция на основе EPPR неоднородна ни в пространстве, ни во времени. Кроме того, в реконструированных полях могут наблюдаться «шахматные» узоры, частично обусловленные случайными эффектами в процедуре EPPR на уровне

отдельных узлов сетки. Эти свойства реконструкции подразумевают необходимость сглаживания получаемых полей пространственной реконструкции в согласовании с методом поточечной регрессии EPPR. С этой целью был разработан метод ядровой 9-точечной регрессии по типу ферзя (QCIS). Он применялся к реконструкции в каждом узле сетки, полученной методом EPPR, для повторной оценки, локального сглаживания и заполнения пространственных и временных пробелов в полях реконструкции с 1400 года.

QCIS работает по схеме, показанной на рис. Пб.2, следующим образом. Реконструкция в центральной точке сетки  $i$  переоценивается с помощью  $j$  (изменяется от 1 до 8) реконструкций окружающих точек сетки (число будет  $<8$  на границах домена или для точек сетки без некоторых соседей) вместе с самой реконструкцией для центрального узла  $i$ , чтобы получить новую центрально-взвешенную реконструкцию в данном узле сетки. Для повторной оценки значений реконструкции в каждой точке сетки QCIS используется тот же метод РГК, та же целевая переменная и те же периоды калибровки и верификации, что и исходная реконструкция на основе EPPR. Это гарантирует полную совместимость и сопоставимость между QCIS и исходными полями, построенными EPPR. Происходит локальное сглаживание пространственного поля реконструкции, что уменьшает «шахматные» узоры и устраняет «ошибки», связанные с сильными различиями значений в соседних точках реконструкции. Кроме того, если какая-либо из реконструкций  $j$ , окружающих точку сетки  $i$ , длиннее исходной реконструкции, новая реконструкция в точке  $i$  будет продлена назад во времени.

Влияние QCIS на калибровку/верификацию модели реконструкции показано на рис. Пб.3 с использованием двух статистических показателей для калибровки (CRSQ и CVRE) и одного для верификации (VRSQ). Как и ожидалось, карты калибровки/верификации «С QCIS» уменьшили «шахматные» узоры, наблюдаемые на картах «Без QCIS» исходного варианта атласа ERDA, что особенно заметно для статистики верификации VRSQ. Наблюдается общее улучшение качества реконструкции на основе статистики VRSQ на карте «С QCIS» к югу от  $65^\circ$  с.ш. (например, к северу от Каспийского моря в западном Казахстане), что указывает на то, что QCIS улучшает реконструкцию путем снижения пространственного шума.



### 6.1.7 Рассмотренные характеристики рядов

Для поиска «скрытой» долгопериодной изменчивости в рядах ДКД были рассмотрены следующие их характеристики:

- 1) Изменение разброса в виде рассчитанных значений стандартного отклонения ряда в скользящем окне шириной 30 лет.
- 2) Время возврата экстремальных событий. Для каждого экстремального события, превышающего два стандартных отклонения по модулю, рассчитывалось число лет до предыдущего аналогичного события. Эти значения были затем сглажены с помощью гауссовского ядра с шириной окна 60 лет для получения непрерывных значений. Тренды и их значимость оценивались по несглаженным данным.

## 6.2 Результаты и их обсуждение

### 6.2.1 Калибровка и верификация

Карты калибровки и верификации атласа ERDA, основанные на среднем поле ансамбля из 16 членов EPPR, показаны на рис. 6.2. В целом, статистика CRSQ на периоде калибровки превышает 40% объясненной дисперсии scPDSI в большинстве точек сетки. То же самое верно и для статистики CVRE на скользящем контроле. Самые слабые статистические показатели CRSQ и CVRE наблюдаются в юго-восточном квадранте домена вблизи Каспийского и Аральского морей, где очень мало древесно-кольцевых хронологий (см. рис. 6.1). На прогностическую способность реконструкции указывают положительные значения VRSQ, VRE и VCE на периоде верификации для большей части пространственного домена, с самыми слабыми результатами снова в юго-восточном квадранте, а также в области выше 60-65° с.ш., где чувствительность деревьев к засухливости выражена слабее (Мацковский 2012). Нижняя правая карта представляет собой среднюю корреляцию (RBAR) между 16 членами ансамбля EPPR. Типичные значения коэффициента корреляции находятся в диапазоне 0,5–0,7, что иллюстрирует некоторый диапазон варибельности результатов реконструкции при различных настройках метода EPPR. Результаты калибровки и верификации, представленные на рис. 6.2 подтверждают общую достоверность реконструкции ERDA.

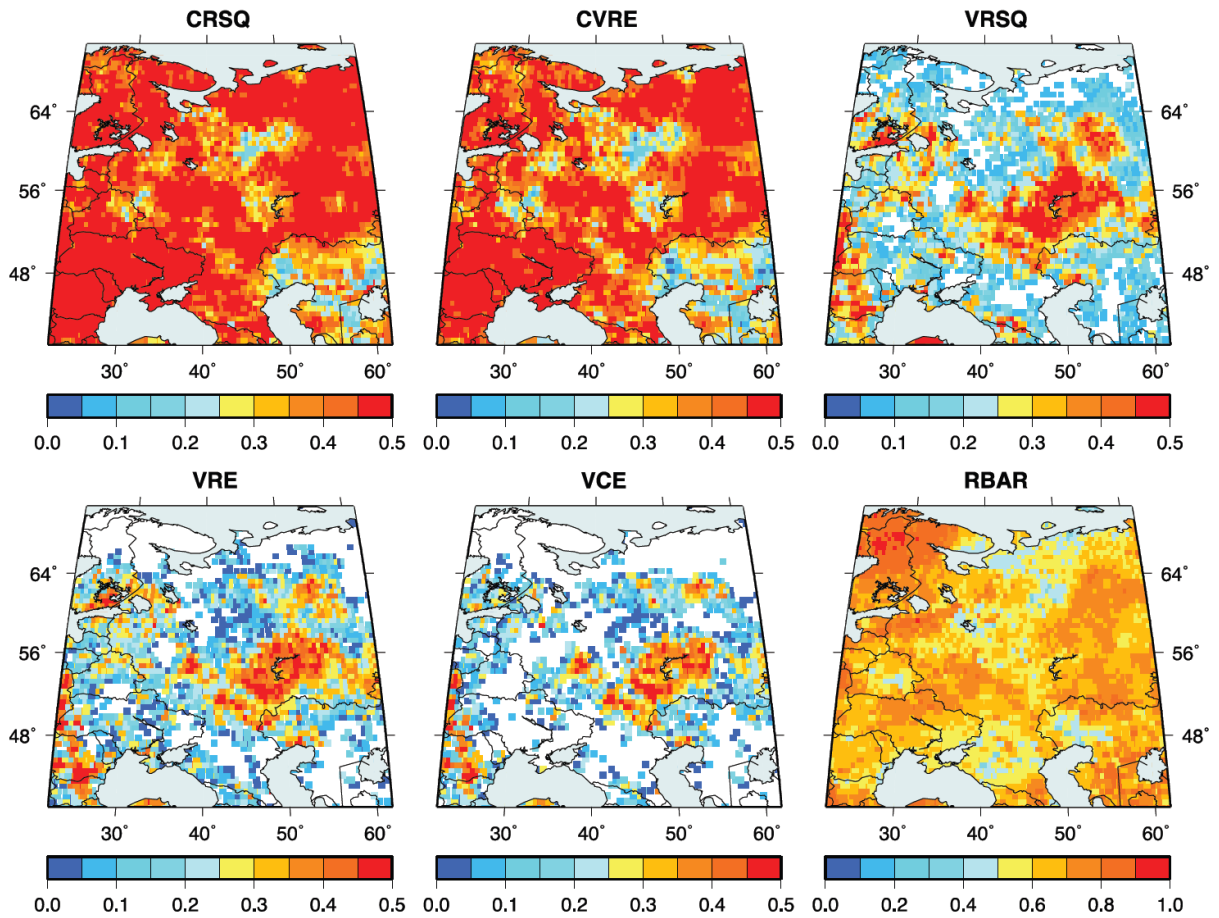


Рисунок 6.2 – Карты калибровки и верификации для Атласа ERDA на основе среднего по ансамблю из 16 членов-реконструкций PPR. Используемые статистические показатели описаны в разделе 6.1.5. Средняя корреляция RBAR между 16 членами ансамбля представлена на нижней правой панели.

### 6.2.3 Долгопериодная изменчивость в рядах засушливости для Поволжья

Для анализа долгопериодной изменчивости в данной главе из всего Атласа был выбран регион Поволжья ( $51,25-56,25^\circ$  с.ш.,  $45,25-55,25^\circ$  в.д.), так как именно для этого региона было показано максимальное качество реконструкции на верификации (рис. 6.2). Хотя исходный ряд засушливости для Поволжья (рис. 6.3) не имеет значимого тренда ( $\alpha = 0,081$ ), характеристики, рассчитанные на его основе, такие как стандартное отклонение в скользящем окне (рис. 6.4) или время возврата экстремальных событий (рис. 6.5) 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.

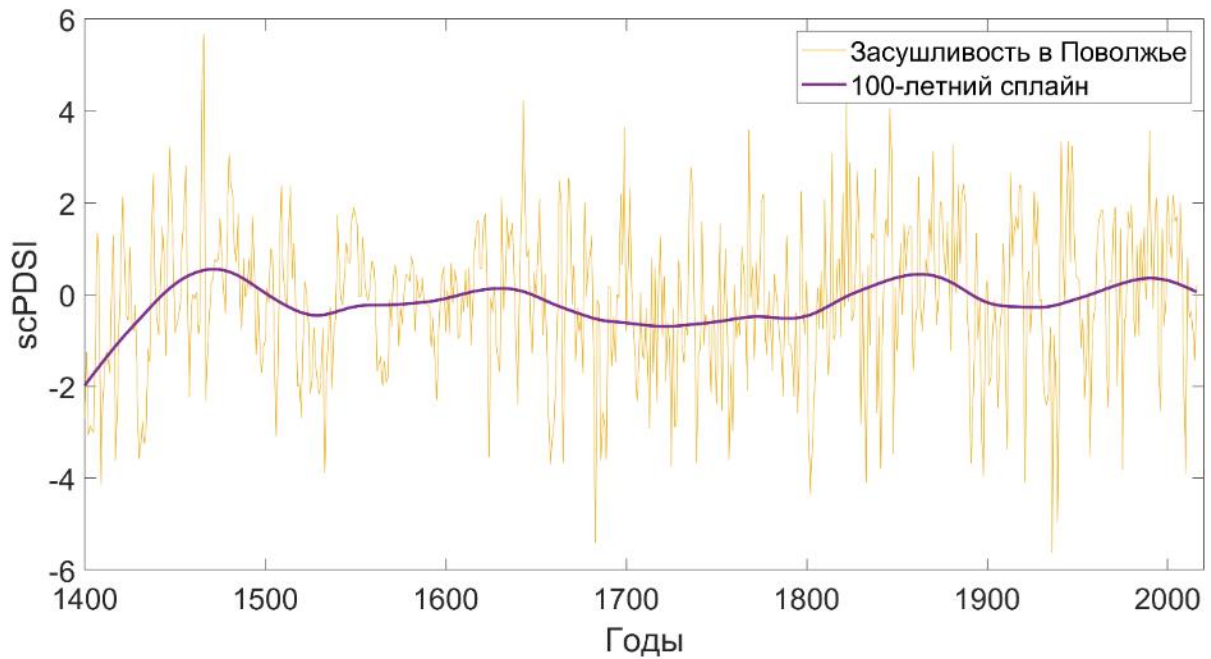


Рисунок 6.3 – Серия показателя засушливости scPDSI для региона Поволжья и ее сглаживание 100-летним сплайном.

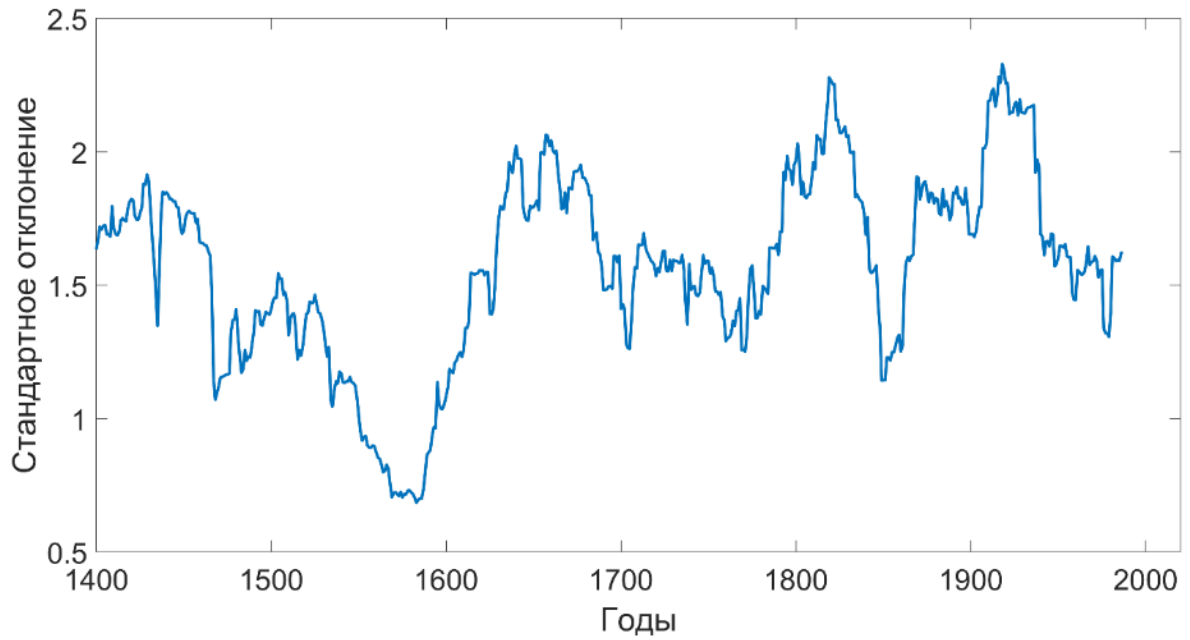


Рисунок 6.4 – Скользящее стандартное отклонение для серии на рис. 6.3 в 30-летнем окне. Значение показано для окна, первый год которого соответствует году на оси.

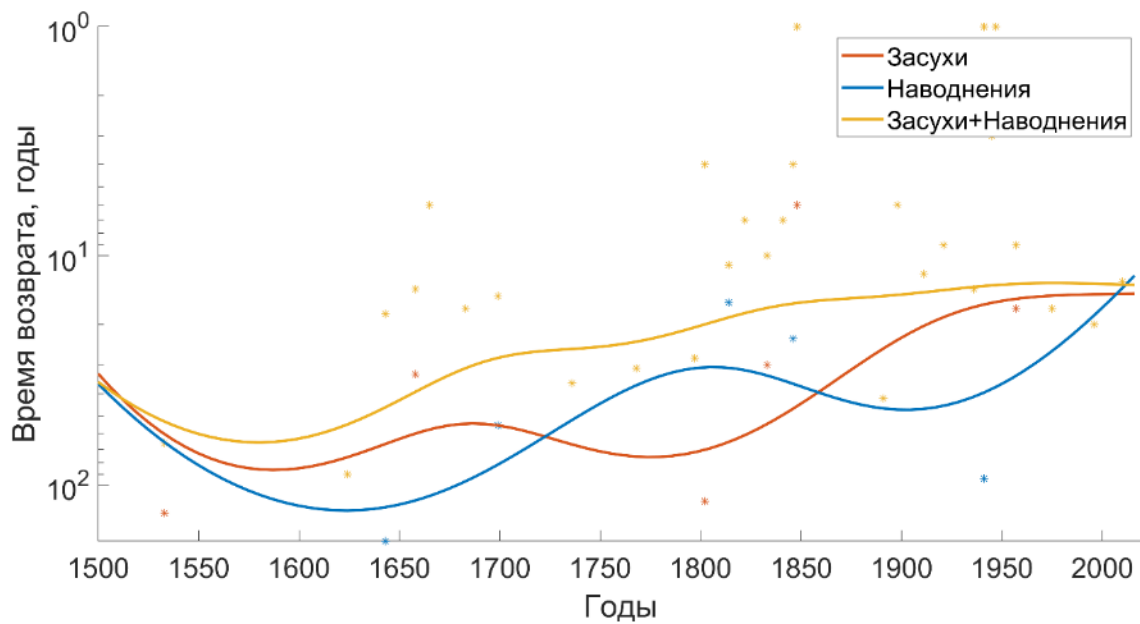


Рисунок 6.5 – Время возврата экстремальных событий (более двух стандартных отклонений по модулю) для серии на рис. 6.3. Время возврата для индивидуальных событий показано звездочками. Сглаженные гауссовским ядром серии показаны линиями.

#### 6.2.4 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, рис. 6.6). Но подтверждая наличие долгопериодной изменчивости в характеристиках реконструированных рядов засушливости, необходимо отметить их временную неоднородность в смысле использованных ДКХ. Как было указано в разделе 6.1.4, 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 стандартизованного 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). Данная реконструкция (рис. 6.7) объясняет 41,6% дисперсии, содержащейся в ежемесячных значениях SPEI ноября – декабря за период 1930–2013 гг. Реконструкция SPEI позволила выявить периоды экстремального переувлажнения (1060-е, 1090-е, 1200-е, 1300-е, 1360-е, 1390-е, 1400-е, 1550-е, 1580-е, 1580-е, 1630-е, 1940-е, 1960-е и 2000-е) и засух (1070-е, 1150-е, 1170-е, 1180-е, 1270-е, 1310-е, 1430-е, 1450-е, 1570-е, 1600-е, 1620-е и 1950-е годы) для северо-запада Аргентинской Патагонии. Хотя реконструкция SPEI показывает, что частота экстремальных явлений увеличилась с 1950 года, текущие уровни не превышают ранее достигнутые, особенно по сравнению с теми, которые были зарегистрированы в периоды средневекового оптимума и ближе к концу малого ледникового периода.

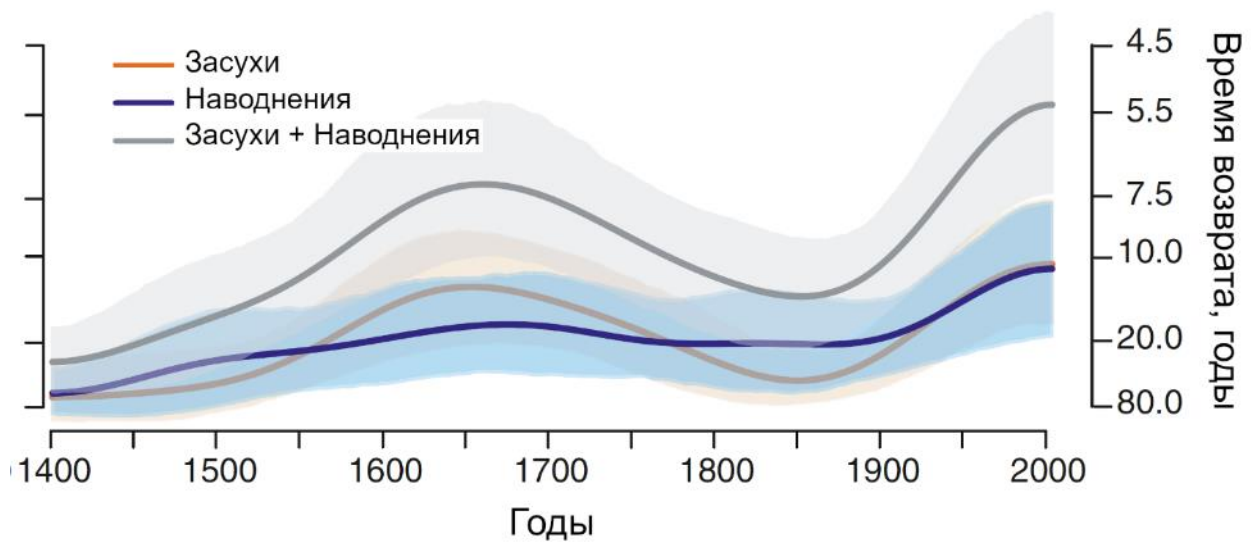


Рисунок 6.6 – Аналогично рис. 6.5, но для всей территории Атласа засух Южной Америки. Рисунок адаптирован из (Morales et al. 2020).

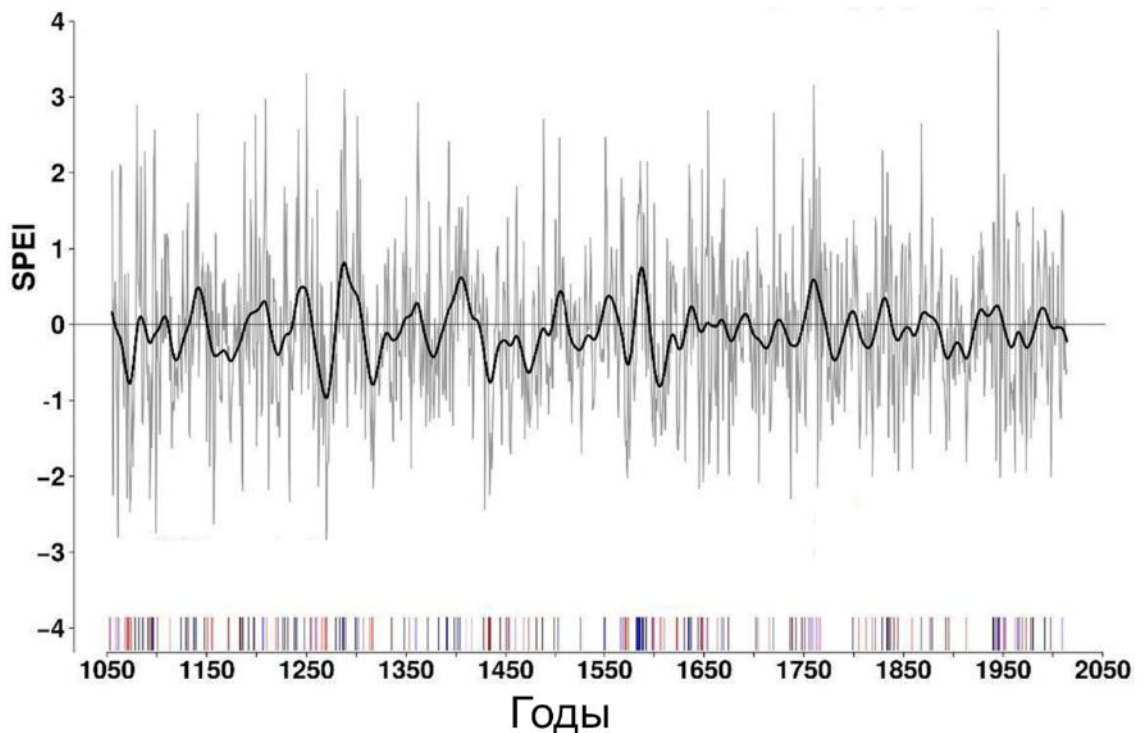


Рисунок 6.7 – Реконструкция SPEI ноября-декабря с 1055 по 2014 год для северо-западной Патагонии (серая линия). 25-летний кубический сглаживающий сплайн (черная линия) подчеркивает декадную изменчивость. Влажные (засушливые) годы реконструкции на основе 90-го перцентиля (10-го перцентиля) показаны синим (красным) цветом над осью абсцисс.

Переходя к скрытой долгопериодной изменчивости реконструкции SPEI для северной Патагонии, можно отметить, что значимые тренды присутствуют в изменении амплитуды выделенной изменчивости на частоте 5.1 лет (положительный) и 35 лет (отрицательный) (рис. 6.8). 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, ось ординат на рис. 6.9 перевернута) наводнений ( $\alpha = 0.01$ ) и засух с наводнениями ( $\alpha = 0.001$ ) (рис. 6.9). 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, как уже было сказано, преобладают обратные тенденции (рис. 6.6).

В характеристиках изменения разброса, рассчитанных как стандартное отклонение в плавающем 30-летнем окне, значимого тренда за период с 1482 года обнаружено не было (рис. 6.10), однако присутствует изменчивость на периоде около 100 лет, тогда как в исходных данных у максимального выделенного значимого цикла период не превышает 51 год (рис. 6.8).

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 самих 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.

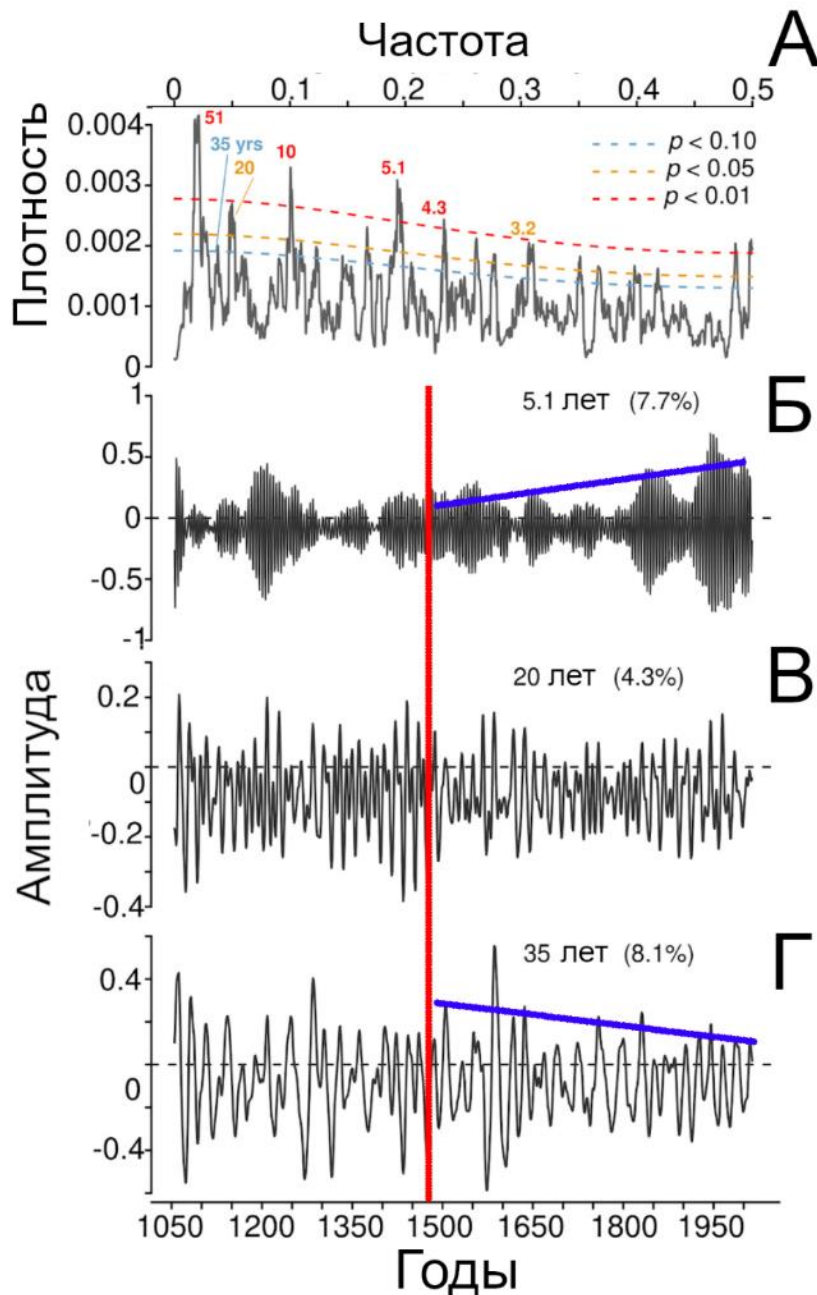


Рисунок 6.8 – А – Спектральная плотность реконструкции SPEI для северной Патагонии (ряд с рис. 6.7) с выделением основных циклов. Цветные пунктирные линии указывают уровни достоверности при  $p < 0,10$  (синий),  $p < 0,05$  (оранжевый) и  $p < 0,01$  (красный). Цветными цифрами обозначены периоды значимых циклов, цвета указывают уровень значимости. Панели Б-Г показывают выделенные циклы реконструкции для основных выделенных периодичностей. Вертикальная красная линия обозначает период после 1482 года, когда реконструкция основана на полном наборе из трех ДКХ. Синими линиями показан линейный тренд выделенных цикличностей (в абсолютных значениях).



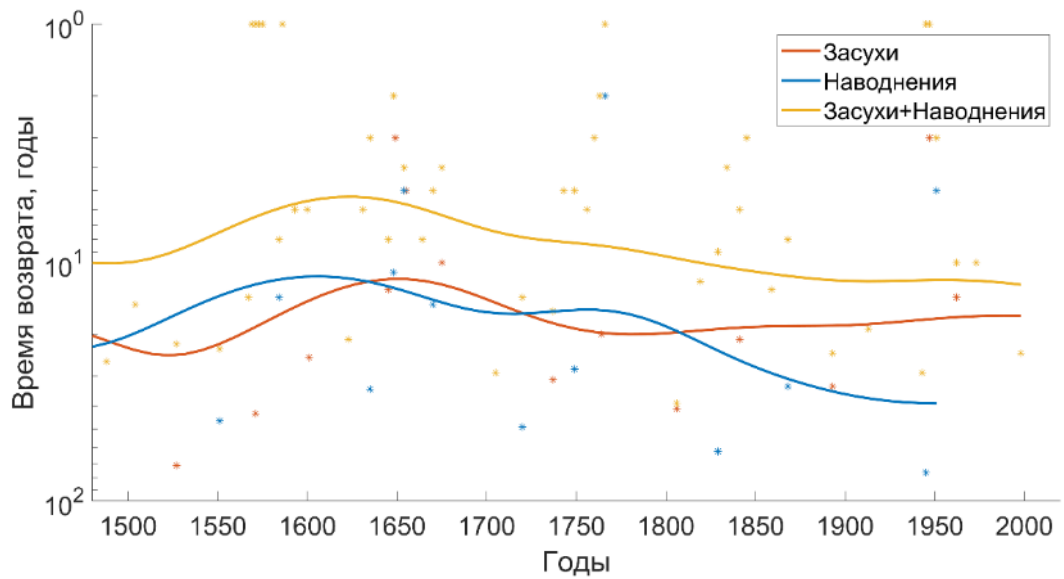


Рисунок 6.9 – Время возврата экстремальных событий (более двух стандартных отклонений по модулю) для серии на рис. 6.7 после 1482 года. Время возврата для индивидуальных событий показано звездочками. Сглаженные гауссовским ядром серии показаны линиями.

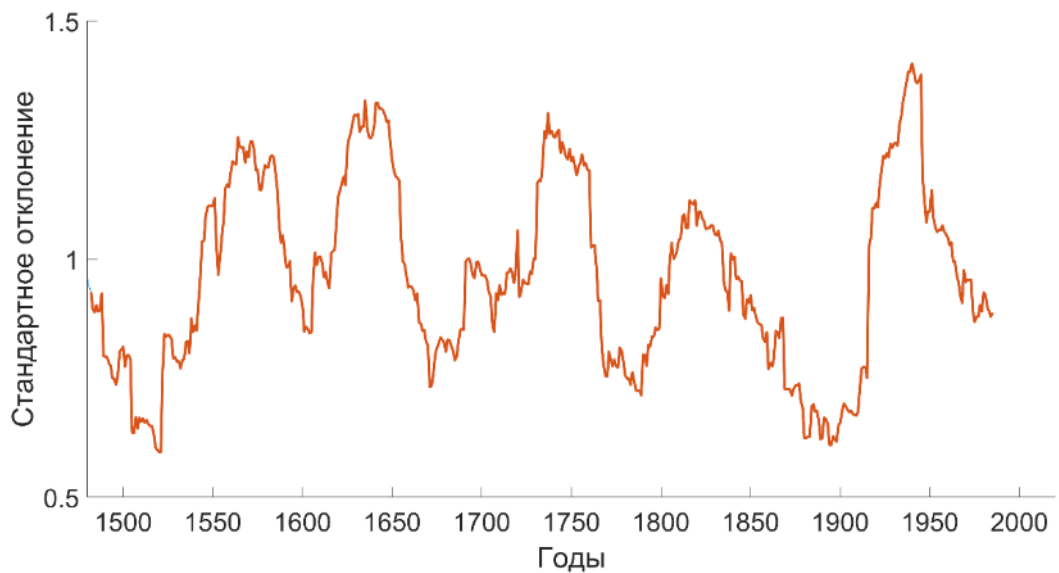


Рисунок 6.10 – Скользящее стандартное отклонение для серии на рис. 6.7 в 30-летнем окне после 1482 года. Значение показано для окна, первый год которого соответствует году на оси.

### 6.3 Выводы к главе 6

1) Построенный Атлас засух Европейской России ERDA является современным продуктом, созданным на основе полного набора имеющихся древесно-кольцевых данных для Европейской территории России, а также на основе самой современной версии методики PPR, ранее использованной для построения крупномасштабных атласов засух по всему миру.

2) Введено понятие «скрытой» долгопериодной изменчивости в ДКД – это долгопериодная изменчивость, не присущая исходным рядам индексов ДКХ (обычно после стандартизации с помощью консервативных методов), то есть не проявляющаяся в изменении средних значений, но которую можно выделить из дополнительных характеристик этих рядов.

3) На основе нескольких рядов реконструированных индексов засушливости для разных регионов показано, что такими характеристиками, обладающими долгопериодной изменчивостью, являются стандартное отклонение в скользящем окне и время возврата экстремальных событий. В частности, показано статистически значимое усиление экстремальности условий увлажнения в Поволжье за последние 600 лет.

4) Описанные характеристики, следовательно, могут использоваться для реконструкции долгопериодных климатических изменений в прошлом, а именно изменений экстремальности климата, даже на основе ДКД, ранее считавшихся неподходящими для этих целей. 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**

### **7.1 Введение**

Как уже было отмечено в первой главе, 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 этой главе будут 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?

Первый вопрос на первый взгляд имеет довольно банальный ответ: если мы подозреваем, что древесно-кольцевые данные не воспроизводят в достаточной степени долгопериодную климатическую изменчивость, то эти подозрения, очевидно, основаны на данных других палеоархивов, эту изменчивость воспроизводящих. Таким образом, в других палеоархивах, обычно имеющих более низкое временное разрешение, долгопериодная изменчивость должна сохраняться лучше. В общем случае это было показано в работе Л. Клиппель и соавторов (Klippel et al. 2020): 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 данной главе будут рассмотрены некоторые из этих примеров, а также будет обсуждаться, 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 (раздел 1.3.3). 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 данной главе приводится пример объединения косвенных данных разного типа для построения температурной реконструкции для северо-восточной Европы за последние два тысячелетия. Хотя наряду с другими палеоархивами используются ДКД годового разрешения, итоговая реконструкция представлена в декадном разрешении, чтобы сделать акцент на долгопериодных климатических изменениях в регионе. Полученная реконструкция сравнивается с другими реконструкциями для северного полушария, внетропических широт, для всей Арктики, а также с реконструкциями для соседнего региона Русской равнины и для аналогичного региона, выделенного из пространственной реконструкции для всей Арктики. Большинство из этих реконструкций основаны на разных типах косвенных данных, но также используется реконструкция Я. Эспера и соавторов, основанная исключительно на древесно-кольцевых данных (Esper et al. 2002).

## **7.2 Материалы и методы**

### **7.2.1 Регион исследования**

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 ( $40^\circ$  в. д.), мысом Челюскин (полуостров Таймыр) на востоке ( $104^\circ$  в. д.) и линией  $60^\circ$  с. ш. на юге (рис. 7.1).

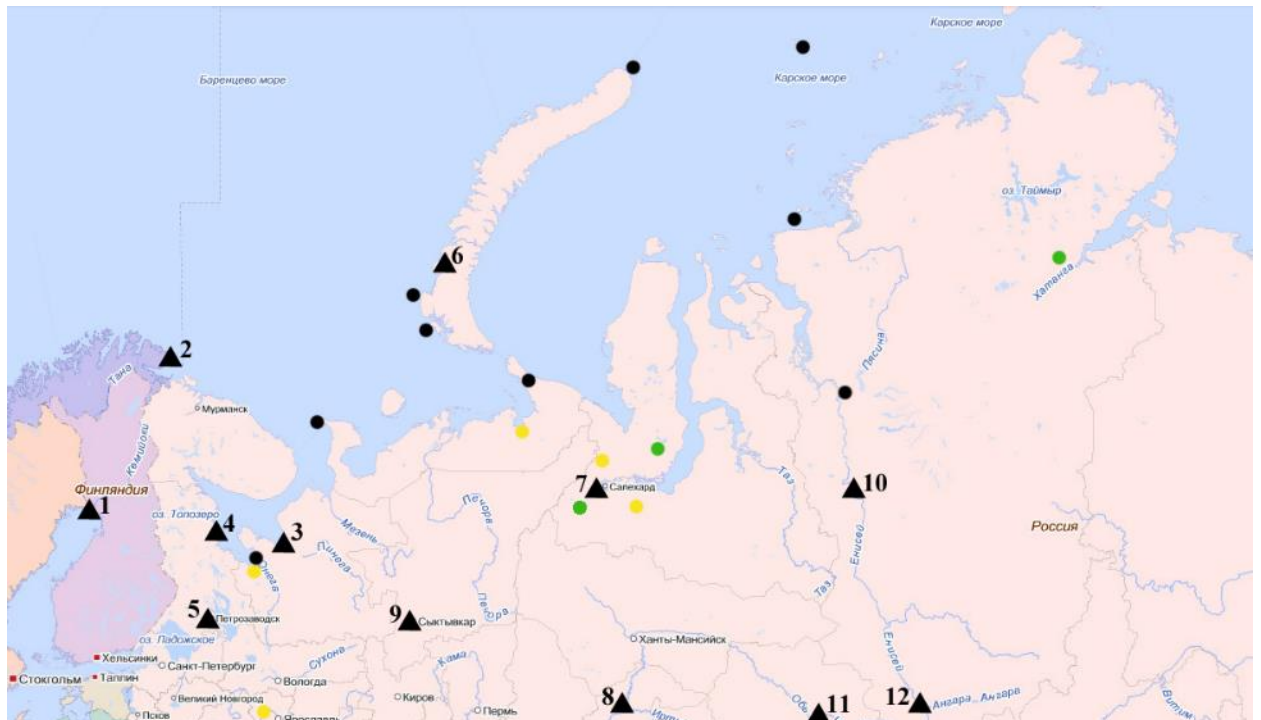


Рисунок 7.1 – Карта-схема исследуемой территории с указанием местонахождения косвенных данных о климате прошлого: споро-пыльцевых данных (желтые круги), древесно-кольцевых данных (зеленые круги) и основных исторических свидетельств (черные круги). Расположение метеостанций с длинными рядами наблюдений в пределах и вокруг региона исследований показано черными треугольниками: 1 – Хапаранда; 2 – Вардё; 3 – Архангельск; 4 – Кемь; 5 – Петрозаводск; 6 – Малые Кармакулы; 7 – Салехард; 8 – Тобольск; 9 – Сыктывкар; 10 – Туруханск; 11 – Томск; 12 – Енисейск.

Поскольку использованные косвенные данные о климате включают исторические источники, западная граница региона определяется территорией, которую новгородцы начали осваивать в начале XII века — это время их первого расселения на правобережье Северной Двины, по сути, начало колонизации северо-восточных территорий. Восточная граница определяется основной территорией исторического освоения русской Арктики в период с середины одиннадцатого до конца семнадцатого века. Для этой территории именно Таймыр был неприступным рубежом, который не удалось преодолеть за все это время.

В данном исследовании были использованы некоторые косвенные данные о климате прошлого, происходящие из областей, расположенных недалеко от границ изучаемого региона. С одной стороны, это связано с достаточной дальностью корреляций температурных полей, а с другой стороны, с уникальностью этих данных, содержащих важную климатическую информацию.

Основной целью данного исследования является разработка реконструкции климата за последние два тысячелетия для обозначенного региона на основе всех доступных косвенных данных. Поскольку большинство используемых косвенных данных (споро-пыльцевые и исторические) представляют среднегодовую температуру воздуха, именно она была выбрана в качестве целевой переменной для реконструкции.

Кроме того, из-за недостатка палеоклиматических данных высокого разрешения в районе исследований была проведена реконструкция среднедекадных температур, то есть средних температур для каждого десятилетия. Дело в том, что человеческое общество реагирует, как правило, не на отдельные, хотя и значительные межгодовые колебания климата, а на более устойчивые экскурсы с характерными временами, сравнимыми с продолжительностью жизни человеческого поколения (20–22 года). Так как для современной части реконструкции (последние 500 лет) были использованы исторические данные, декадное разрешение реконструкции вполне соответствует использованным материалам. Также следует учитывать, что использованные данные высокого разрешения – хронологии ширины годичных колец деревьев – отражают только температуры теплого сезона. Тем не менее, это не снижает их значения из-за устойчивой корреляции между среднегодовыми и летними температурами в районе исследований. Таким образом, в данном исследовании в качестве косвенных климатических данных были использованы годичные кольца деревьев, а также споро-пыльцевые данные и исторические свидетельства.

### **7.2.2 Косвенные данные о климате прошлого**

Известно, что разные прокси-данные имеют разное временное разрешение. Например, данные о пыльце редко достигают разрешения лучше, чем 50 лет, тогда как данные годичных колец позволяют проводить реконструкцию с разрешением до года и даже сезона. Исторические данные могут иметь еще более высокое разрешение – суток и даже нескольких часов. Однако для данных высокого разрешения, таких как древесно-кольцевые

хронологии, может снижаться их способность восстанавливать долговременные климатические изменения. Эта проблема была описана в главе 1. Сегодня в научном сообществе преобладает мнение, что для построения качественной реконструкции необходимо использовать данные как высокого, так и низкого разрешения. Первые позволяют реконструировать такие кратковременные явления, как перепады температур после сильных извержений вулканов, а вторые позволяют корректно реконструировать амплитуду долговременных климатических изменений (Клименко, Слепцов 2003; Moberg et al. 2005; Jones et al. 2009; PAGES Consortium 2017).

Поэтому в данной работе были использованы следующие прокси-данные (рис. 7.2):

1. Хронологии по ширине годичных 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. Подробное описание всех косвенных временных рядов, использованных в данном исследовании, приведено в таблице 7.1.

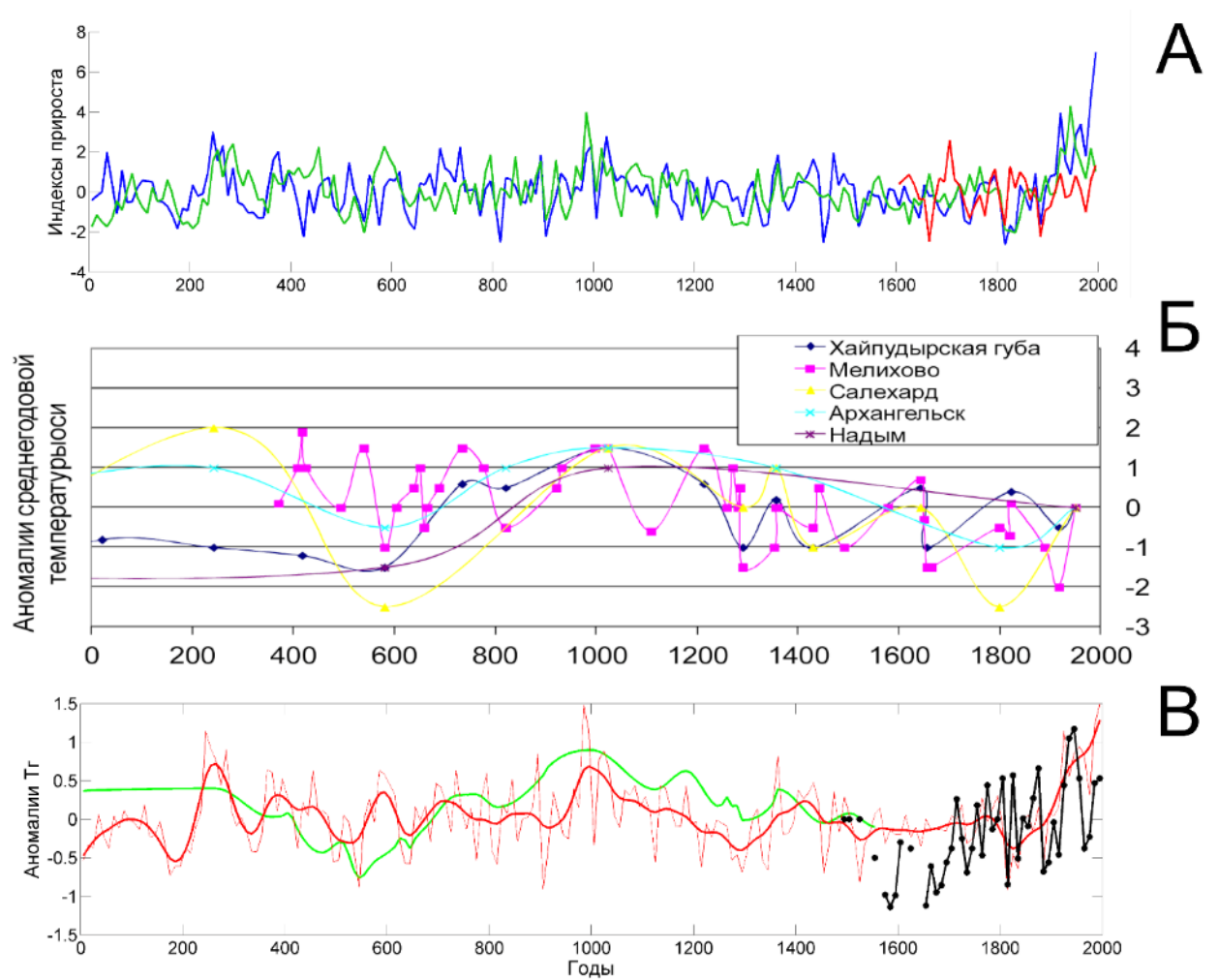


Рисунок 7.2 – А – Индексы ширины годичных колец для Ямала (синий) (Hantemirov and Shiyatov 2002), Таймыра (зеленый) (Naurzbaev et al. 2002) и Полярного Урала (красный) (Gurskaya et al. 2012). Б – Реконструкции среднегодовых отклонений температуры на основе споро-пыльцевых данных. Точками представлены хронологические привязки по радиоуглеродным датировкам, скорректированным по древесно-кольцевым данным. Интерполяция значений проведена с помощью кубических сплайнов. В – Усредненные косвенные данные о температуре: споро-пыльцевые (зеленый), древесно-кольцевые (красный), исторические (черный). Здесь и далее отклонения температуры выражены относительно периода 1951–1980 гг.



Таблица 7.1.

Прокси-данные, использованные для реконструкции климата северо-восточной Европы.

Тип	Расположение	Долгота	Широта	Год начала	Год окончания	Источник
Споро-пыльцевые	Надым	72	64	545	1555	(Velichko et al. 1997)
Споро-пыльцевые	Мелихово	38	57	370	1555	(Климанов и др., 1995)
Споро-пыльцевые	Салехард	66	67	0	1555	(Velichko et al. 1997)
Споро-пыльцевые	Архангельск	43	64	0	1555	(Velichko et al. 1997)
Споро-пыльцевые	Хайпудырская губа	60	68	0	1555	(Velichko et al. 1997; Andreev and Klimanov 2000)
Ширина годовичных колец	Ямал	70	67	0	1995	(Hantemirov and Shiyatov 2002)
Ширина годовичных колец	Таймыр	102	72	0	1995	(Naurzbaev et al. 2002)
Ширина годовичных колец	Северное течение Оби	64	65	1605	1995	(Gurskaya et al. 2012)
Историческое	Северо-восточная Европаре	50–80	65–80	1495	1995	(Klimenko 2010)

### 7.2.3 Инструментальные данные

Для калибровки реконструкции и верификации ее современной части использовались усредненные данные двенадцати метеостанций с многолетними рядами наблюдений, расположенных в пределах исследуемой территории и вокруг нее (рис. 7.1). Наблюдения на

этих станциях начались в следующие годы (в хронологическом порядке): Архангельск — 1813 г., Петрозаводск — 1817 г., Сыктывкар — 1817 г., Вардё — 1829 г., Тобольск — 1829 г., Томск — 1837 г., Хапаранда — 1860 г., Кемь — 1862 г., Енисейск — 1871 г., Туруханск — 1881 г., Салехард и Малые Кармакулы — 1886 г., по Глобальной исторической климатологической сети (Peterson and Vose 1997). Следует отметить, что наблюдения на центральных для исследуемого района станциях — Салехарде и Малых Кармакулах — начались значительно позже, чем на остальных, только в 1886 г. Поэтому хотя для верификации использовались все доступные данные наблюдений, но для калибровки использовалась только их часть – после 1886 г. В связи с этим первое значение декадных значений временных рядов, использованных для калибровки, относится к 1895 г.

#### **7.2.4 Объединение различных типов косвенных данных**

Перед объединением различных типов прокси-данных было проведено усреднение каждого типа данных. Усредненные за десять лет древесно-кольцевые данные представлены на рис. 7.2В. Споро-пыльцевые данные перед осреднением были хронологически скорректированы с использованием осредненных древесно-кольцевых данных. Необходимость корректировки исходной хронологии, основанной на радиоуглеродных датировках, вытекает из сравнительно низкой точности радиоуглеродного метода, которая на временном отрезке данного исследования (0–2000 гг. н. э.) может превышать столетие (Reimer et al. 2009). Поэтому основные пики споро-пыльцевых данных были поставлены в соответствие с экстремумами осредненной древесно-кольцевой хронологии после сглаживания 30-летним скользящим средним. Эта процедура позволила скорректировать радиоуглеродные датировки, имеющие на один-два порядка большую неопределенность, чем дендрохронологические даты, а также учесть возможное отклонение пиков из-за разного разрешения использованных данных. Проведенные корректировки описаны в таблице 7.2, при этом максимальная из них в абсолютном значении составила 64 года.

Часть споро-пыльцевых данных не была использована из-за их низкой достоверности. К ним относятся, в частности, данные за последние 450 лет, поскольку радиоуглеродные датировки для данного периода очень неточны (Reimer et al. 2009). Также не были использованы данные из Надыма до 545 г. н.э., так как предыдущая датировка для данного разреза более чем на 1000 лет старше, а интерполированные значения показывают

пониженные температуры в период 1–545 гг. н.э., тогда как споро-пыльцевые данные из других разрезов, имеющие более точную хронологическую привязку, демонстрируют климатические колебания разного знака на столетнем временном масштабе. Остальные ряды споро-пыльцевых данных были взвешены и усреднены.

Таблица 7.2.

Корректировка радиоуглеродного датирования озерных отложений с использованием годичных колец

Датировка по $C^{14}$	Датировка на основе древесно-кольцевых данных	Соответствующее климатическое событие	Знак температурной аномалии события
241	265	Пик Римского оптимума	+
580	545	Максимальное похолодание первого тысячелетия н.э.	-
734	735	Пик раннего средневекового потепления	+
820	815	Похолодание ранней эпохи викингов	-
1023	1000	Средневековый оптимум	+
1108	1125	Похолодание внутри средневекового оптимума	-
1213	1185	Второй пик средневекового оптимума	+
1290	1295	Большой минимум солнечной активности (минимум Вольфа)	-
1356	1365	Большой максимум солнечной активности	+
1429	1455	Извержение вулкана Кувае	-
1441	1505	Малый арктический оптимум	+
1491	1555	Начало похолодания в арктике	-

Наборам данных из Архангельска, Салехарда и Надыма были присвоены более низкие веса (0,5), поскольку они менее подробно датированы, чем данные из Мелихово и Хайпудырской Губы, и поэтому содержат больше интерполированных, а не измеренных значений. Двум последним наборам были присвоены веса 1. Усредненные данные по пыльце представлены на рис. 7.2 В. В процессе совмещения разных типов косвенных данных также были рассмотрены варианты использования споро-пыльцевых данных без корректировки датировок и без взвешивания (т.е. усреднение всех данных проводилось с одинаковыми весами). Реконструкции, построенные с использованием различных вариантов обработки споро-пыльцевых данных, представлены на рис. 7.3 для оценки влияния проведенных манипуляций на итоговую реконструкцию.

### **7.2.5 Построение реконструкции**

Для итоговой реконструкции был использован подход «объединения и масштабирования» (Composite Plus Scaling, CPS) (Jones et al. 2009). Все три полученных ряда для разных типов косвенных данных были объединены следующим образом: древесно-кольцевые данные за весь период исследования (5–1995 гг.), споро-пыльцевые данные за период 5–1555 гг. и исторические данные за период 1495–1995 гг. были усреднены с равными весами.

Далее полученный ряд был масштабирован посредством приведения основных его характеристик к соответствующим климатическим характеристикам изучаемой территории, рассчитанным по имеющимся метеонаблюдениям. Результаты исследований последних десятилетий показали, что коэффициент арктического усиления (феномена большей изменчивости температуры в Арктике по сравнению с изменчивостью для Северного полушария или для Земли в целом) колеблется в пределах от 1,72 по инструментальным данным за последние сто пятьдесят лет (Bekryaev et al. 2010) до 3,4 по палеоклиматическим данным за последние 3 млн лет (Miller et al. 2010). М. Уинтон (Winton 2006) основываясь на анализе данных климатического моделирования определил, что среднегодовое потепление в Арктике в среднем в 1,9 раз больше, чем среднее глобальное значение. Значение максимального повышения температуры полученной реконструкции в эпоху средневекового оптимума составляет 1,1°C, что при сравнении с рядами некоторых полушарных реконструкций температуры (Клименко 2009; Moberg et al. 2005) приводит к оценке коэффициента арктического усиления 3,8, что превышает верхнюю границу

указанного диапазона. Такая разница, в первую очередь, может быть связана с недооценкой средневекового потепления в указанных полушарных реконструкциях. Тем не менее, было решено привести значения реконструкции в полное соответствие с имеющимися оценками коэффициента арктического усиления на основе палеоклиматических данных и скорректировать отклонение пиковой температуры в эпоху средневекового оптимума на  $1,0^{\circ}\text{C}$ . Поскольку реконструированные температуры при максимальных потеплениях (в 980-х и 1940-х годах) примерно на  $1^{\circ}\text{C}$  выше среднего значения для референтного периода 1951–1980 годов, дисперсия была сохранена за счет снижения минимальных реконструированных значений. Минимальные значения реконструкции в 1810-е годы были установлены на уровне  $-1,3^{\circ}\text{C}$  по ранним инструментальным данным трех метеостанций: Хапаранда, Архангельск и Петрозаводск (Peterson and Vose 1997). Таким образом, калибровка реконструкции была проведена как по палеоклиматическим, так и по ранним инструментальным данным. Кроме того, в сравнительных целях была использована стандартная калибровка по целевому инструментальному ряду наблюдений. Эта процедура заключается в расчете коэффициентов линейной регрессии ряда значений реконструкции на ряд инструментальных данных с последующей коррекцией первых. Также в целях сравнения был использован альтернативный подход к калибровке, при котором дисперсия и среднее значение реконструкции приводятся в соответствие с аналогичными параметрами инструментального ряда данных. Этот подход к калибровке представляется более предпочтительным, чем обычная линейная регрессия, так как не приводит к потере изменчивости из-за зашумленности косвенных климатических данных, что было продемонстрировано в работе (Lee et al. 2008). На рисунке 7.3 представлены все три варианта реконструкции с различной калибровкой.

На рис. 7.3 видно, что использование различных вариантов калибровки реконструкции, а также различных вариантов предварительной обработки споропыльцевых данных не сильно влияет на масштаб реконструированных колебаний температуры и не меняет последовательность основных эпизодов потепления и похолодания на всем временном интервале реконструкции. Однако, основываясь на всей совокупности знаний об изменении климата Арктики, в том числе изложенных в данной работе, для последующих исследований рекомендуется использовать именно первый вариант реконструкции, основанный на оценке эффекта арктического усиления и значениях

минимальных температур, полученных по ранним инструментальным наблюдениям (черная линия на рисунке 7.3).

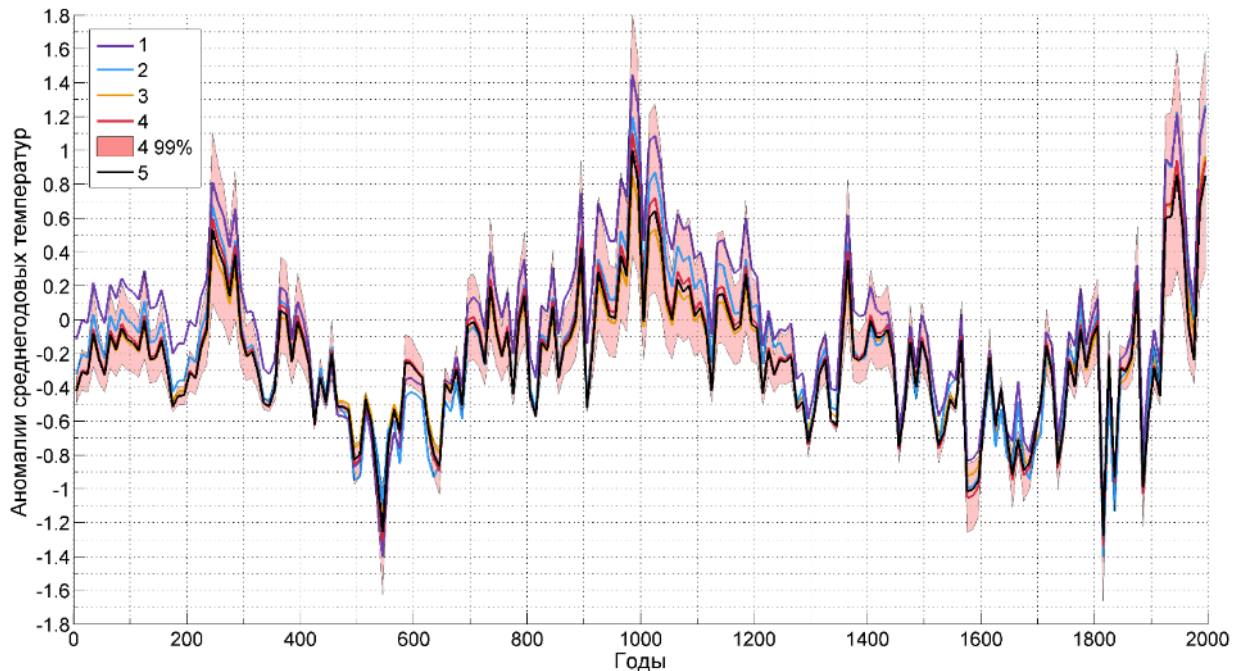


Рисунок 7.3 – Различные варианты реконструкции с различной предварительной обработкой споро-пыльцевых данных: 1) без коррекции датировки и без взвешивания; 2) с коррекцией датировки и взвешиванием. Варианты реконструкции с различной калибровкой: 3) приведение к значениям среднего и дисперсии, оцененным по инструментальным данным; 4) калибровка на основе линейной регрессии, с доверительным интервалом 99%; 5) калибровка на основе оценки эффекта арктического усиления и минимальных значений, полученных по рядам ранних инструментальных наблюдений.

### 7.3 Реконструкция температуры для северо-восточной Европы

Сравнение итоговой реконструкции с рядом, основанным на инструментальных наблюдениях, показывает их хорошее соответствие (рис. 7.4). 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 (рис. 7.1). Окончательный вариант реконструкции для Северо-Восточной Европы показан на рис. 7.4.

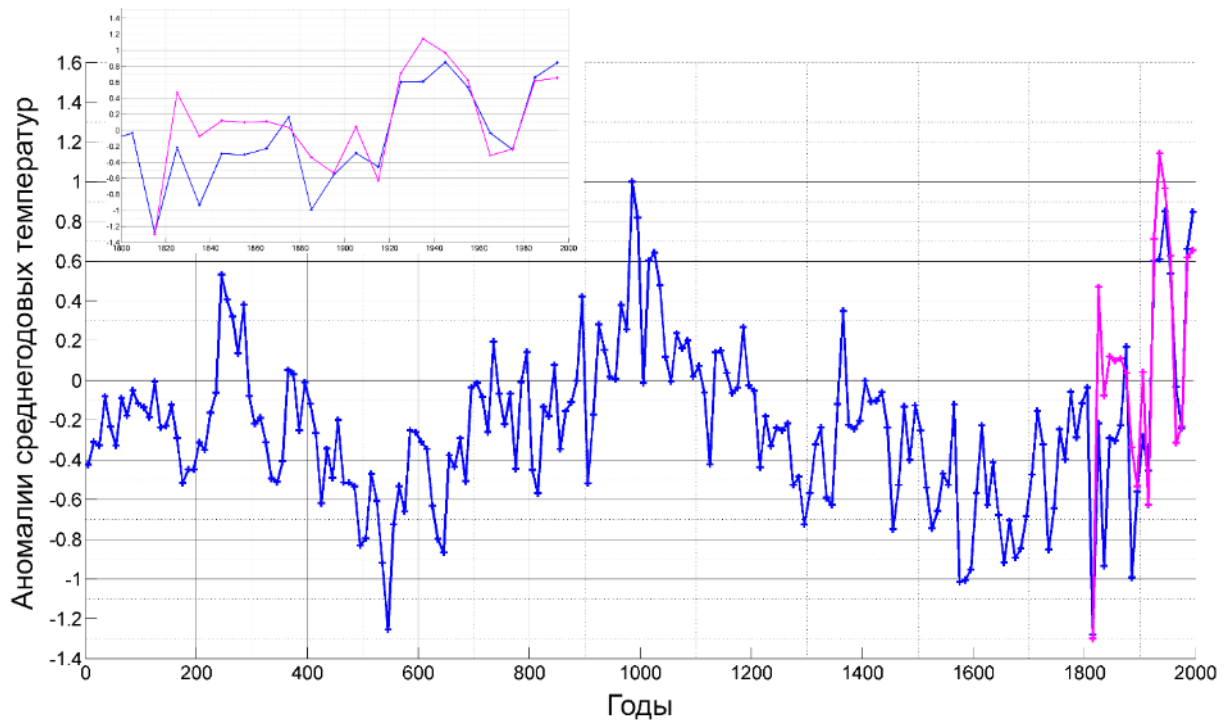


Рисунок 7.4 – Итоговая реконструкция аномалий средних декадных значений годовой температуры для северо-востока Европы (синий цвет) и инструментальные данные (красный цвет). Вставка использована для увеличения инструментального периода.

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).

70-летняя периодичность, вероятно, связана с квазипериодическими изменениями атмосферной и океанической циркуляции, известными как Северо-Атлантическое колебание (САК), и связанной с ними пульсацией притока теплых вод в Норвежское и

Баренцево моря (Атлантическое мультидекадное колебание). Этот же источник, вероятно, объясняет 50-летнюю периодичность – это следует из результатов климатического моделирования и реконструкций САК за последнюю тысячу лет (Ortega et al. 2015; Cook et al. 2019).

Двадцатилетний цикл обычно связывают с солнечным форсингом, но это объяснение может натолкнуться на некоторые трудности, поскольку этот цикл хорошо выражен только в океанах Южного полушария (Клименко 2011). Это обстоятельство заставляет искать его происхождение скорее в динамике Эль-Ниньо Южного колебания (ЭНЮК), показатель которого имеет слабый спектральный пик 22 года. Последняя версия подтверждается тем, что в исследуемом районе корреляция метеорологических параметров с явлениями ЭНЮК наиболее сильна для всей внетропической зоны Северного полушария (Trenberth 1976).

#### **7.4 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) (рис. 7.5, таблица 7.3). Эти реконструкции, помимо того, что они охватывают различные регионы, основаны на различных наборах палеоклиматических данных и на разных методических подходах к их объединению. Так, для реконструкции А. Моберга (Moberg et al. 2005) и соавторов использовалось вейвлет-разложение рядов палеоклиматических данных с последующим объединением составляющих из разных частей спектра: высокочастотная и долгопериодная изменчивость обрабатывались по отдельности. Для реконструкции Й. Вернера и соавторов (Werner et al. 2018) было использовано моделирование на основе байесовского подхода, а реконструкция Я. Эспера и соавторов (Esper et al. 2002) основана исключительно на древесно-кольцевых данных.



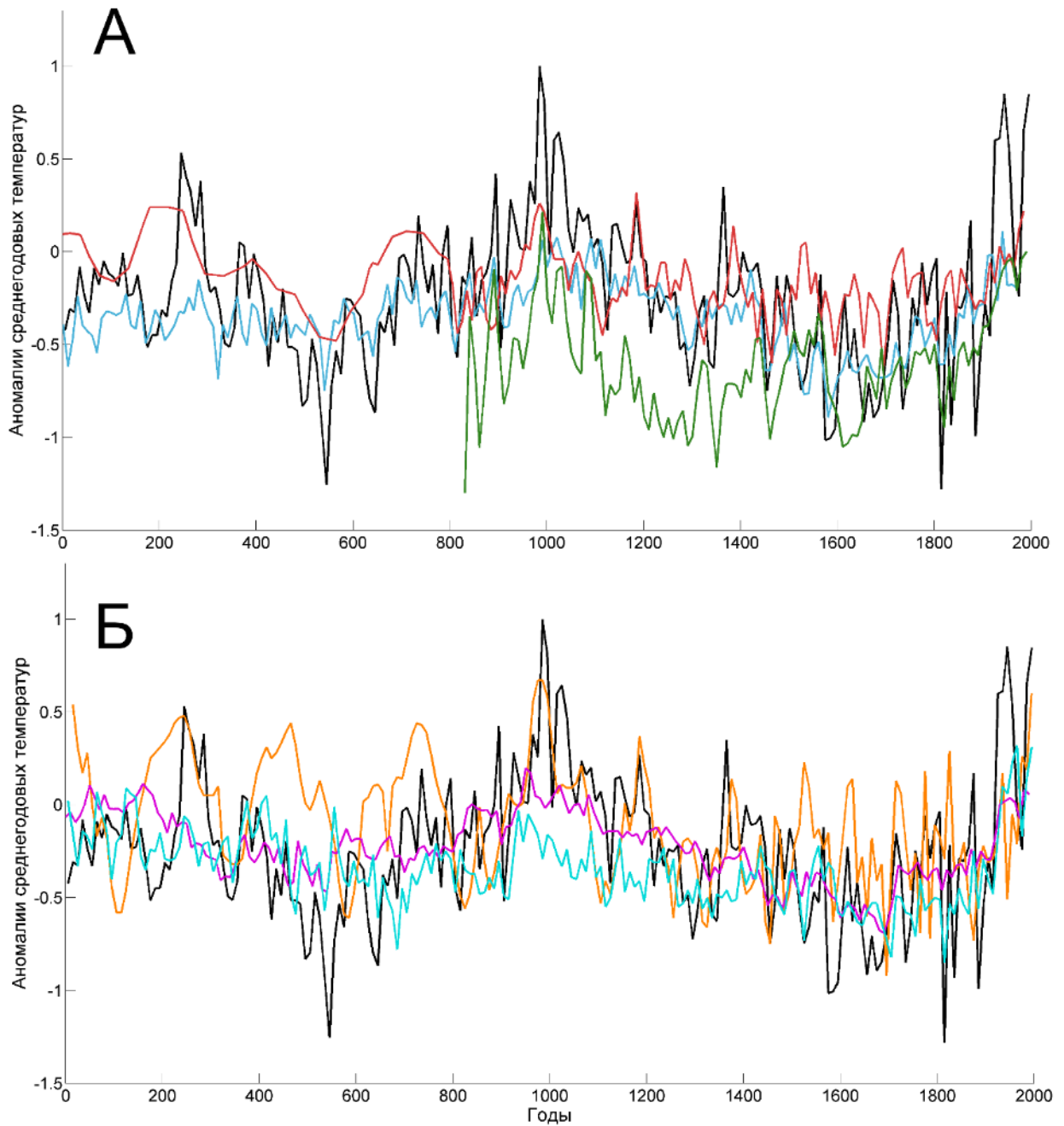


Рисунок 7.5 А – Сравнение реконструкции температуры для северо-восточной Европы (черный цвет) с полушарными реконструкциями (Moberg et al. 2005) (синий), (Клименко 2009) (красный) и (Esper et al. 2002) (зеленый). Б – Сравнение реконструкции температуры для северо-восточной Европы (черный цвет) с региональными реконструкциями: для внетропических широт Северного полушария 30–90° (Ljungqvist 2010) (сиреневый), панарктической (Kaufman et al. 2009) (зеленый), и для Русской равнины (Клименко, Слепцов 2003) (оранжевый).

При сравнении полученной реконструкции с полушарными и региональными реконструкциями видно, что температурная изменчивость в первой гораздо выше, чем в других (рис. 7.5). Этот факт согласуется с известным эффектом арктического усиления. Что касается панарктической реконструкции (Kaufman et al. 2009), реконструированные колебания температуры для всего Арктического региона также довольно умеренные по сравнению с реконструкцией для северо-восточной Европы (рис. 7.5 Б). Это может быть связано с различием колебаний температуры в Западной и Восточной Арктике, которые могут находиться в противофазе друг к другу, что снижает общий разброс колебаний температуры в регионе. Поскольку реконструкция для северо-восточной Европы относится к относительно небольшому региону, все климатические колебания в ней должны быть более выраженными.

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.).

В отличие от многих других рассмотренных реконструкций, полученная реконструкция показывает быструю смену эпизодов потепления и похолодания, характерную для высоких широт. Большая амплитуда колебаний температуры (по сравнению со средними широтами) приводит к возникновению довольно коротких потеплений (длительностью от двух до четырех десятилетий) даже во время длительных холодных стадий типа Малого ледникового периода (например, в 1350–1370, 1400–1440, 1470–1510, 1770–1810 гг.). В эти периоды температура достигала, а иногда даже превышала значения для некоторых десятилетий XX в. Эти короткие эпизоды представляют большой интерес, поскольку связаны с основными импульсами освоения и колонизации северо-восточных окраин Европы (Клименко и др. 2012). Существование трех эпизодов

потепления в Арктике в 15 веке также подтверждается исследованиями, основанными на объединении различных косвенных данных, ранних инструментальных наблюдений и результатов численного моделирования (Crespin et al. 2009).

Сравнение полученной реконструкции с реконструкцией для внетропических широт (рис. 7.5 Б) показывает хорошее соответствие долгопериодных колебаний. Тем не менее, абсолютные минимумы двух реконструкций различны: реконструкция Ф. Юнгквиста (Ljungqvist 2010) имеет минимум на границе XVII и XVIII вв., тогда как полученная реконструкция – в середине VI и в начале XIX вв. Это может быть связано с использованием различных наборов прокси-данных, а также с различной географией изучаемых регионов. Например, климатический эффект похолодания после сильных вулканических извержений выражен в высоких широтах, тогда как в средних широтах может наблюдаться и противоположный эффект (потепление) (Shindell et al. 2004). Этим может объясняться факт попадания абсолютного минимума полученной реконструкции на 1810-е годы, т.е. во время одного из мощнейших извержений последнего тысячелетия (Тамбора, 1815). Другие значительные похолодания также соответствуют мощным извержениям: Таупо, 177 г. н.э.; Рабаул, 540 г. н.э.; неопознанное тропическое извержение, 639 г. н.э.; Ксудач, 900 г. н.э.; Самалас, 1257 г. н.э.; Куваэ, 1453 г. н.э.; Билли Митчелл, 1580 г. н.э.; Уайнапутина, 1600 г. н.э.; Аву, 1641 г. н.э., Тарумаи, 1739 г. н.э., Косегина, 1835 г. н.э., Кракатау, 1883 г. н.э., Катмай, 1912 г. н.э.

Менее выраженные климатические явления могут значительно различаться в региональном масштабе, что подтверждает современная климатология (Wanner et al. 2008). В глобальном масштабе в декадных и столетних изменениях климата, вероятно, доминируют радиационные факторы, тогда как для арктического региона сопоставимое значение могут иметь циркуляционные факторы, т.е. внутренняя климатическая изменчивость (Hegerl et al. 2018; Bokuchava and Semenov 2021).

Сравнение реконструкции для северо-восточной Европы с реконструкцией для центральной России (Клименко, Слепцов, 2003) также обнаруживает схожую интерпретацию крупных климатических событий, таких как средневековый теплый период, малый ледниковый период и современный этап потепления (рис. 7.5 Б). Но реконструкция для северо-восточной Европы демонстрирует бóльшую изменчивость, а иногда и довольно значительные различия на десятилетних масштабах— например, потепление в конце IX-го



Самое близкое совпадение реконструкции для северо-восточной Европы было получено с одной из последних реконструкций для Арктики из работы (Werner et al. 2018). Для этой пространственной реконструкции, основанной на наиболее современной компиляции палеоклиматических данных по всей Арктике, было использовано более 40 различных архивов палеоклиматической информации и современная методика BARCAST, основанная на байесовском подходе. Для сравнения двух реконструкций, из пространственной реконструкции был выделен регион, соответствующий региону данного исследования (раздел 7.2.1), данные для него были осреднены и переведены в декадные значения. Коэффициент корреляции двух реконструкций декадного разрешения равен 0,69 для общего периода 5-1995 г. (таблица 7.3), а для периода после 750 г. н.э., для которого реконструкция (Werner et al. 2018) считается более надежной, коэффициент корреляции равен 0,81.

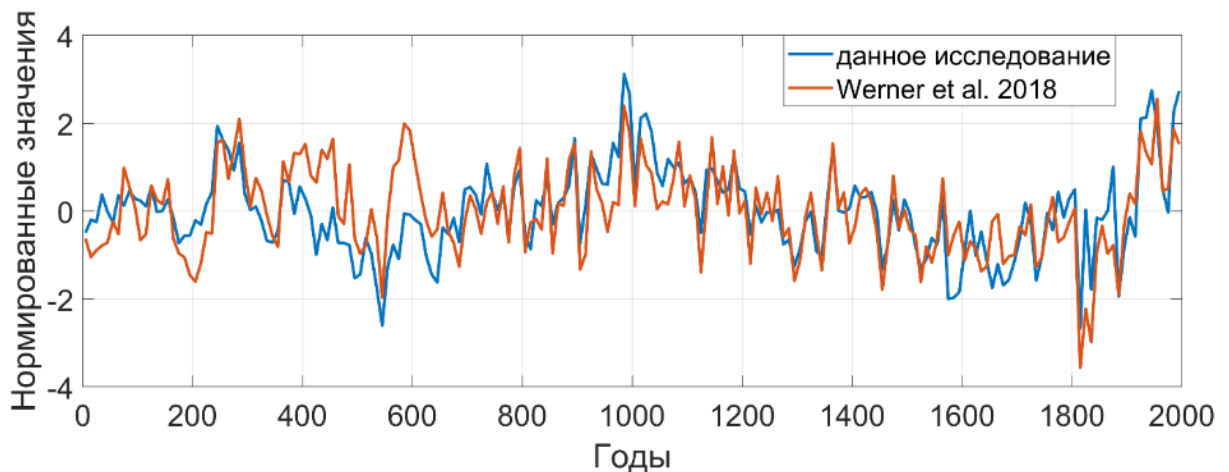


Рисунок 7.6 – Сравнение полученной реконструкции для северо-восточной Европы (синий) с пространственной реконструкцией (Werner et al. 2018) для Арктики (оранжевый). Из пространственной реконструкции были выделены значения, соответствующие региону данного исследования, и они были приведены к декадным значениям. Обе реконструкции нормированы за общий период.

Такая согласованность двух рядов (рис. 7.6) тем более удивительна, что из 9 архивов, использованных в данном исследовании, и более 40 архивов, использованных в работе (Werner et al. 2018), только два из них (древесно-кольцевые хронологии для Таймыра и

Ямала) используют одни и те же исходные данные, но и те по разной методике. 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.

### **7.5 Сравнение долгопериодной изменчивости в древесно-кольцевых данных с другими косвенными источниками информации о климате прошлого**

В данном разделе 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 годичных 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 (рис. 7.7).

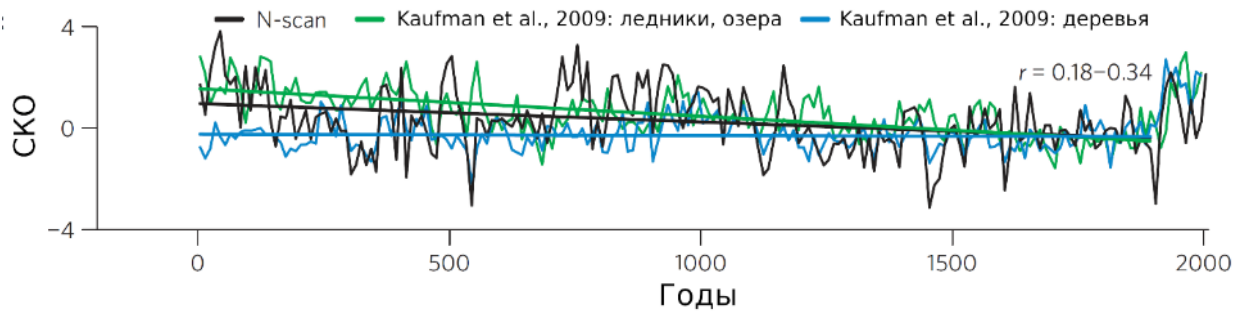


Рисунок 7.7 – Сравнение угла наклона линейного тренда реконструкции N-scan (Esper et al. 2012b) на основе древесно-кольцевых данных (черный) с трендами реконструкций для Арктики (Kaufman et al. 2009) на основе ледниковых и озерных палеоархивов (зеленый) и древесно-кольцевых данных (синий). Адаптировано из рис. 3с работы (Esper et al. 2012b).

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. Оба набора древесно-кольцевых данных, использованных для этих реконструкций, являлись пионерными в первую очередь из-за количества проведенных измерений соответствующих параметров за каждый год реконструируемого периода. Оба типа анализов – и измерение максимальной плотности годичных колец рентгенографическим методом, и анализ содержания двух различных стабильных изотопов ( $C^{13}$  и  $O^{18}$ ) в отдельных годичных кольцах являются весьма трудозатратными, а также требуют больших финансовых расходов. Поэтому 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 достаточные периоды. Под качеством тут подразумевается не только точность хронологической привязки, но и чувствительность измеренного параметра годовых колец (например, максимальная плотность обычно гораздо чувствительнее ширины), и количество полученных измерений.

Третий пример – это пространственная реконструкция летних температур северного полушария за последнее тысячелетие на основе исключительно древесно-кольцевых архивов (Wilson et al. 2016; Anchukaitis et al. 2017). Она основана на 54 ДКХ различных параметров годовых колец – ширины, максимальной плотности и оптической плотности. Как было показано в работе (Wilson et al. 2016), эта реконструкция хорошо соотносится со средним значением четырех мульти-прокси реконструкций для северного полушария, включающих данные низкого разрешения (Ammann and Wahl 2007; Hegerl et al. 2007; Mann et al. 2008; Ljungqvist 2010) – корреляция серий, сглаженных 20-летним сплайном, равна 0,76 за период 918-1998 гг. Еще одно подтверждение наличия адекватно представленной долгопериодной изменчивости в данной реконструкции – ее сравнение с реконструкцией атлантической мультидекадной изменчивости (колебаний температуры поверхности океана в северной Атлантике) на основе содержания титана в ленточных глинах годового разрешения из канадской Арктики (Lapointe et al. 2019, 2020; Lapointe and Bradley 2021), представленное на рис. 7.8. Очевидна хорошая долгопериодная согласованность двух реконструкций, что позволяет говорить о достаточной представленности долгопериодной изменчивости в реконструкции температуры северного полушария, основанной исключительно на ДКД. Правда, в отличие от двух предыдущих примеров, данная реконструкция покрывает лишь период после 918 г. н.э., т.е. не позволяет оценить температурный тренд за последние 2000 лет. Это еще раз указывает на тот факт, что на данный момент отсутствует достаточное количество высококачественных хорошо реплицированных температурно-чувствительных древесно-кольцевых архивов, позволяющих построить температурную реконструкцию для северного полушария на их основе за два последних тысячелетия.

Еще один пример – это беспрецедентная по длине 7,5 тысячилетняя хронология колебаний содержания стабильного изотопа углерода  $C^{13}$  из финской Лапландии (Helama et al. 2018), использованная для реконструкции облачности и климатических режимов, подобных малому ледниковому периоду, с 5500 г. до н.э. (Helama et al. 2021). Исходные



древесно-кольцевые данные, использованные в этих исследованиях, были перекрестно датированы по ширине годовых колец, что гарантирует точную хронологическую привязку, но изотопные измерения были проведены с декадным разрешением, что позволило получить недостижимую ранее длину изотопной хронологии.

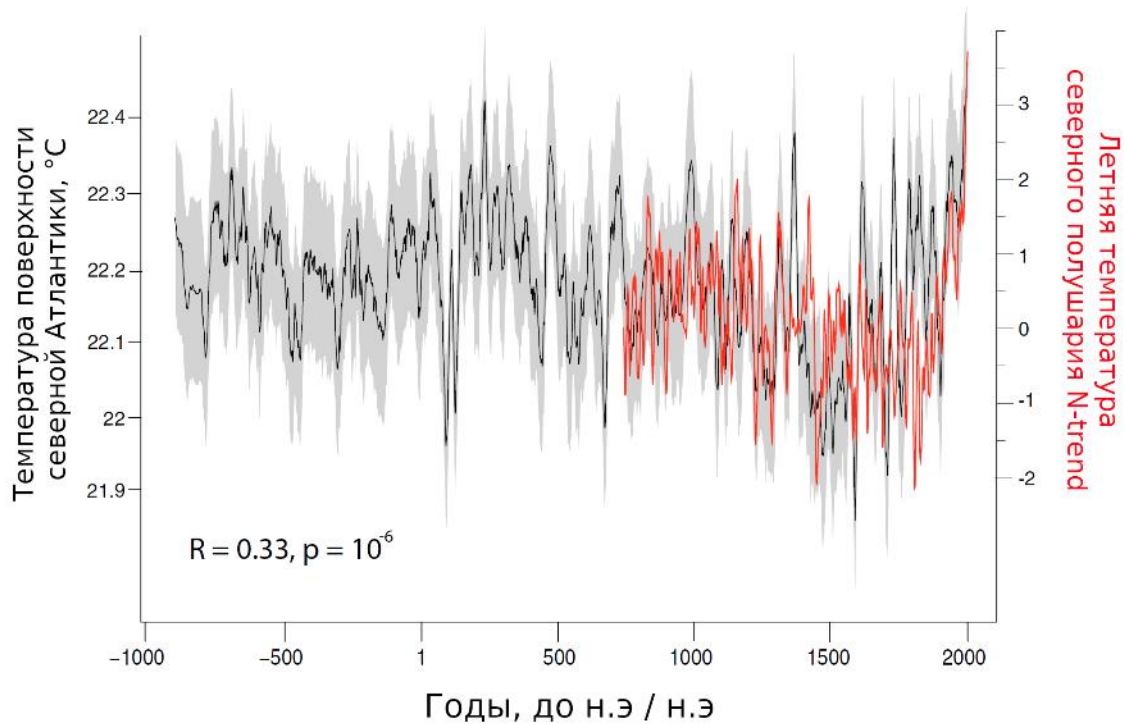


Рисунок 7.8 – Сравнение реконструкции N-TREND (оранжевый, Wilson et al. 2016) с реконструкцией температуры поверхности северной Атлантики на основе содержания титана в ленточных глинах канадской Арктики (Lapointe et al. 2020). Адаптировано из рис. 5d работы (Lapointe et al. 2020).

Полученная изотопная хронология была использована вместе с реконструкциями температуры на основе ширины и плотности годовых колец (они были просуммированы) для получения реконструкции условий, похожих на условия Малого ледникового периода (МЛП). Было показано как наличие долгопериодной изменчивости в полученной реконструкции, так и ее согласованность с данными из других палеоархивов (рис. 7.9).

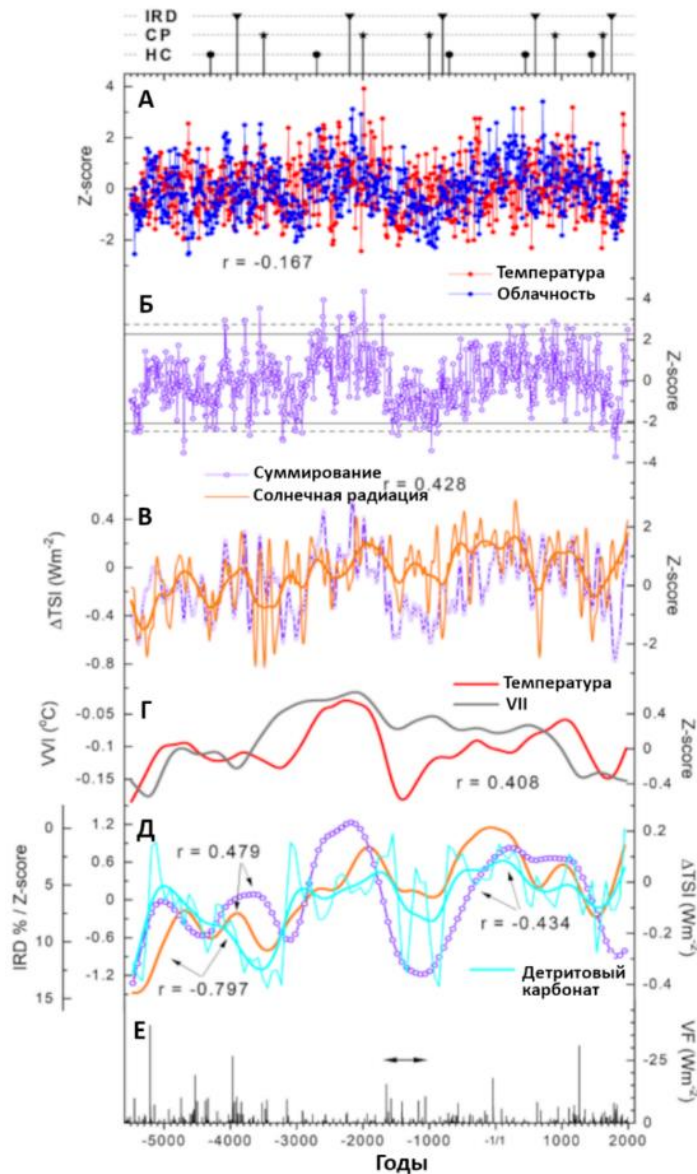


Рисунок 7.9 – Косвенные данные о климате за последние 7,5 тысяч лет. Нормированные реконструкции температуры и облачности (А) и полученная кривая их суммирования (Б) в сравнении с реконструкцией общей солнечной радиации (Steinilber et al. 2009) (В), индексом вулканического воздействия (VII) (Kobashi et al. 2017) (Г) и данными об айсберговой активности в северной Атлантике (IRD, детритовый карбонат) (Bond et al. 2001) и солнечной радиации (Д); и вулканического воздействия (Kobashi et al. 2017) (Е). 2,5 и 97,5 процентиля (пунктирные горизонтальные линии) и 5 и 95 процентиля (непрерывные горизонтальные линии) показаны для кривой суммирования (Б). Записи были отфильтрованы с использованием сплайна (жирные линии), соответствующих 500-летней (В) и 1000-летней жесткости (Г, Д). Повышенный уровень вулканической активности с середины второго до начала первого тысячелетия до н. э. показан горизонтальной стрелкой (Е). Также показано (вверху), время усиления айсберговой активности в северной Атлантике (IRD) (Bond et al. 2001), события холодных полюсов (CP) (Mayewski et al. 2004) и холодные события голоцена (HC) (Wanner et al. 2011). Рисунок адаптирован из работы (Helama et al. 2021).

Последний пример, который будет приведен в данном разделе – 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 наилучшее совпадение наблюдается с пыльцевыми архивами, а также рядом, основанном на сумме всех этих трех типов архивов, причем величина угла наклона убывающего тренда очень близка для ДКД и суммы архивов низкого разрешения (рис 7.10). 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. Новые появляющиеся наборы древесно-кольцевых данных, измеренных все с большей точностью, повторностью и покрывающие большие временные интервалы (Björklund et al. 2020; Torbenson et al. 2022) проявляют те свойства, нехарактерные для предыдущих измерений, которые позволяют надеяться на получение новых реконструкций, сохраняющих максимальный объем информации как о высокочастотной, так и о долгопериодной изменчивости климата в прошлом.

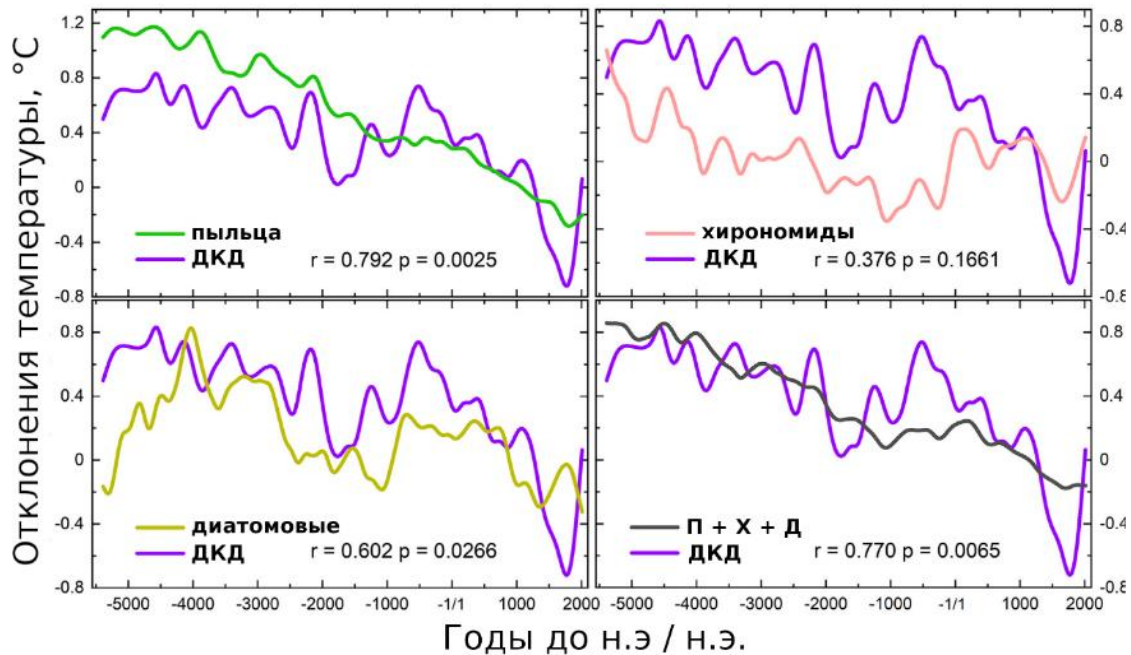


Рисунок 7.10 – Сравнение долгопериодной изменчивости в древесно-кольцевых данных (ДКД) на основе оптической плотности сосны из северной Финляндии (Helama et al. 2022) и различных архивов низкого разрешения из Фенноскандии (Sundqvist et al. 2014) – пыльцевых, хирономидных, диатомовых и всех этих трех типах архивов (П + X + Д). Рисунок адаптирован из работы (Helama et al. 2022).

## 7.6 Выводы к главе 7

1) В данной главе представлена реконструкция годовых температур для северо-восточной Европы, основанная на различных косвенных данных — древесно-кольцевых, споро-пыльцевых и исторических данных. Она покрывает последние два тысячелетия с декадным разрешением.

2) Сравнение полученной реконструкции 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.

3) Полученная реконструкция показывает бóльшую амплитуду изменчивости по сравнению с другими реконструкциями. Эту особенность может быть связана, с одной стороны, с эффектом арктического усиления, а с другой — с относительно небольшими размерами исследуемой территории, на которой климатические изменения практически синхронны и не компенсируют друг друга при усреднении по региону.

4) Представленная реконструкция, основанная на одной из простейших методик палеоклиматических реконструкций с использованием различных палеоархивов – объединения и масштабирования (composite plus scaling) – очень близко повторяет реконструкцию для того же региона с использованием современного метода BARCAST на основе байесовского подхода, включающего вычислительно-затратное моделирование. Это говорит о первостепенном значении качественных палеоклиматических данных и о второстепенности применяемой методики реконструкции.

5) Представленные в данной главе результаты свидетельствуют о том, что древесно-кольцевые данные могут успешно использоваться для реконструкции долгопериодной климатической изменчивости как в комбинации с данными низкого разрешения, так и сами по себе.

6) Сильный климатический сигнал в измеренных параметрах годовых колец и высокая репликация измерений на всем протяжении интервала реконструкции являются, судя по всему, основными требованиями для восстановления долгопериодной климатической изменчивости на основе древесно-кольцевых данных.

## Глава 8. Прогнозы прироста

Принципиальное наличие возможности долгопериодных изменений характеристик годичных 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 несут 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 данной главе 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.

### 8.1 Введение

Существует достаточно доказательств того, что в последние десятилетия глобальная температура воздуха находится на рекордных исторических уровнях, а эпизоды засухи стали более суровыми (Jones et al. 2001; O'Neill et al. 2017). При сценариях сильного увеличения выбросов парниковых газов Глобальные климатические модели (ГКМ) свидетельствуют об усилении этих тенденций к концу XXI века (Pachauri et al. 2014). Выраженные засушливые условия, вызванные изменением климата, напрямую влияют на лесные экосистемы, что приводит к уменьшению площади лесов и исчезновению видов в биомах по всему миру (Allen et al., 2010, 2015; Anderegg et al., 2015).

Средиземноморские леса Центрального региона Чили (СЛЦЧ, рис. 8.1) – это уникальная экосистема средиземноморского типа в Южной Америке. В настоящее время находится под угрозой исчезновения из-за фрагментации леса, вызванной вырубками, изменением землепользования (Miranda et al. 2016), лесными пожарами и климатическими изменениями, особенно повлиявшими на этот регион (González-Reyes et al. 2017; Bowman et al. 2019). Экосистема СЛЦЧ по-прежнему отличается высоким биоразнообразием

эндемичных видов и объявлена горячей точкой биоразнообразия из-за сильного антропогенного воздействия (Armesto et al., 2007; Myers et al., 2000). В СЛЦЧ произрастают два вида деревьев, достигающие здесь своей северной границы ареала: широколиственный *Nothofagus macrocarpa* [(DC.) Vásquez and Rodr.] и хвойный *Austrocedrus chilensis* [(D. Don) Pic. Ser et Bizz.]. Эти два вида считаются исчезающими (Souto and Gardner 2013; Baldwin 2018). Ранее было показано, что эти деревья являются ценными источниками палеоклиматической информации (Villalba and Veblen 1998; Le Quesne et al. 2006; Roig et al. 2006; Boninsegna et al. 2009; Oliveira et al. 2010; Venegas-González et al. 2018b, a), из-за значительной чувствительности ширины годичных колец этих видов к климатической изменчивости. Их высокая климатическая чувствительность также является важным фактором для проводимого здесь исследования.

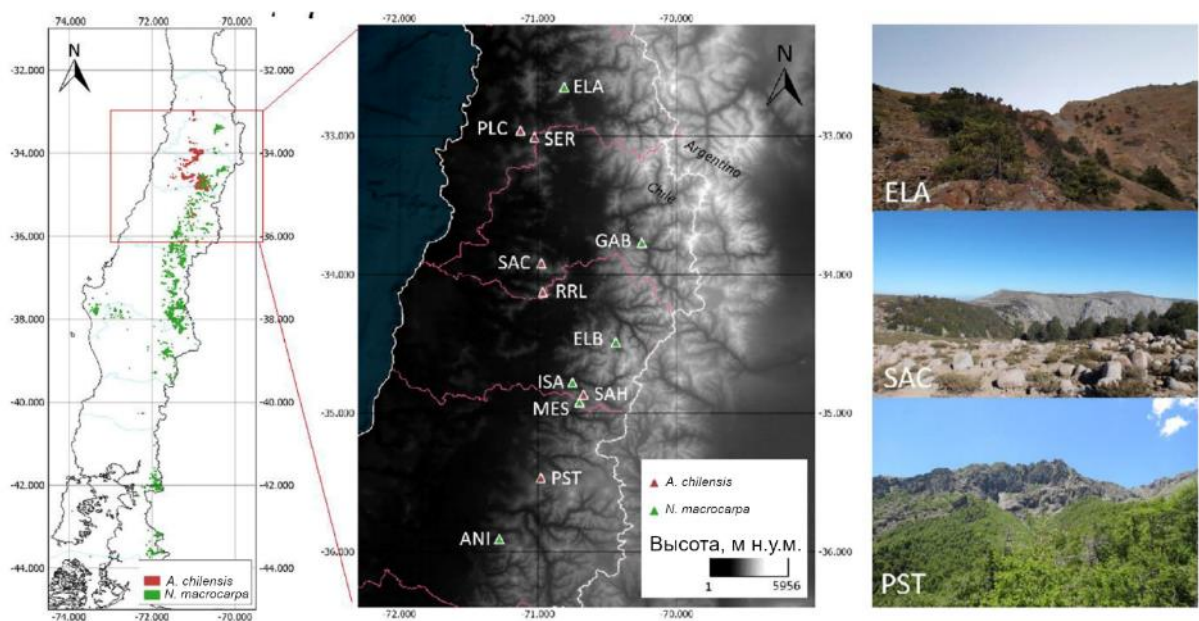


Рисунок 8.1 – Регион и объекты исследования. Слева показан естественный ареал двух исследованных пород деревьев на территории Чили. В центре показаны исследованные пробные площади в естественных насаждениях *N. macrocarpa* (красный) и *A. chilensis* (зеленый) в СЛЦЧ. Справа показаны фотографии некоторых исследованных насаждений (сверху вниз: популяция *A. chilensis* в Эль-Асьенто (ELA), *N. macrocarpa* в природном заповеднике Альтос-де-Кантильяна (SAC) и *N. macrocarpa* в национальном парке Съете Тасас (PST).

В течение последних трех десятилетий в центральном регионе Чили наблюдаются значительное усиление засушливости (Boisier et al. 2016, 2018) и повышение температуры (Vuille et al. 2015; Burger et al. 2018), что также выражается в значительном уменьшении радиального прироста *N. macrocarpa* и *A. chilensis* (Le Quesne et al. 2006; Garreaud et al. 2017; Venegas-González et al. 2018b). С 2010 г. в центральной части Чили наблюдается непрерывная череда засушливых лет, вызванных повторяющимися нейтральными условиями Эль-Ниньо Южного колебания, вызывающими годовое уменьшение осадков на 25-45% (Garreaud et al. 2017, 2019). Согласно работе Д. Кристи и соавторов (Christie et al. 2011), использовавшие хронологию ШГК *A. chilensis* для реконструкции засушливости в регионе, нынешняя засуха представляет собой беспрецедентное явление, по крайней мере, за последние шестьсот лет. Засуха оказала сильное влияние на средиземноморские экосистемы центральной части Чили, в том числе из-за увеличения числа крупных лесных пожаров и удлинения сезона пожаров (González et al. 2018).

ГКМ прогнозируют, что наблюдаемые тенденции усиления засушливости и потепления сохранятся и в будущем (O'Neill et al. 2017). В центральном регионе Чили по различным сценариям ожидается годовое повышение температуры от  $\sim 1,2^{\circ}\text{C}$  (сценарий выбросов парниковых газов (далее сценарий) 2.6) до  $\sim 3,5^{\circ}\text{C}$  (сценарий 8.5) и уменьшение осадков от  $\sim 3\%$  (сценарий 2.6) до  $\sim 30\%$  (сценарий 8.5) к 2100 г. (Bozkurt et al. 2018). Согласно недавним исследованиям, антропогенное воздействие является ведущим фактором, обуславливающим повышение температуры и сокращение количества осадков и стока в центральном регионе Чили (Boisier et al. 2018; Barria et al. 2019). Однако возможная реакция средиземноморских лесов региона на прогнозируемое изменение климата еще недостаточно изучена.

Большая часть исследований по моделированию сосредоточена на влиянии климатических изменений на распространение древесных пород (например, Staniczenko et al. 2017). Другая группа исследований направлена на прогнозирование изменений прироста деревьев разных пород. На сегодняшний день используется несколько подходов к прогнозированию прироста деревьев в будущем (Chen et al. 2010; Guiot et al. 2014; Charney et al. 2016; Gea-Izquierdo et al. 2017; Pompa-García et al. 2017; Sánchez-Salguero et al. 2017; Rahman et al. 2018). Эти подходы можно условно разделить на три основные группы:



- Линейный подход (Chen et al. 2010; Pompa-García et al. 2017; Sánchez-Salguero et al. 2017; Rahman et al. 2018);
- Имитационный подход (например, (Guiot et al. 2014; Shishov et al. 2016, 2021; Gea-Izquierdo et al. 2017);
- Эмпирический подход (например, Charney et al. 2016).

Каждый из подходов имеет свои преимущества и ограничения. Основное ограничение линейного подхода заключается в том, что он может нарушать один из основных принципов роста деревьев — принцип лимитирующих факторов (Шиятов и др. 2000). Этот принцип (первоначально сформулированный Либихом) гласит, что скорость роста растений ограничена теми ресурсами окружающей среды, которых в каждый момент роста меньше всего (Fritts 1976). Применительно к прогнозам прироста деревьев это означает, что, например, при повышении температуры и постоянном обеспечении влагой в определенный момент температура может перестать быть лимитирующим фактором, а влажность почвы начнет ограничивать рост деревьев, когда к корням растений будет поступать меньше воды из-за повышенного испарения. В случае использования линейного подхода некоторые климатические параметры-предикторы в линейном уравнении, используемом для прогнозирования прироста, могут изменить коэффициенты и даже знак коэффициентов. В этом смысле имитационный подход, в котором имитационные модели, описывающие физиологические процессы в деревьях, применяются для моделирования формирования годичных колец, может служить более реалистичной заменой линейному подходу. Имитационные модели могут описывать смешанные и нелинейные реакции прироста деревьев на изменяющиеся климатические факторы, в согласии с принципом лимитирующих факторов. Они также могут учитывать различные процессы, связанные с ростом деревьев (см. Таблицу 1 в Guiot et al. 2014). Основным ограничением имитационного подхода является сложность используемых моделей. Некоторые из этих моделей также требуют наличия большого количества климатических и других данных суточного и даже более высокого разрешения (например, Ваганов, Шашкин 2000; Misson 2004).

Одной из наиболее проработанных имитационных моделей роста деревьев является модель Ваганова-Шашкина (Vaganov et al. 2006). Поскольку эта модель довольно сложна в

применении, имеет более 40 настраиваемых параметров и использует метеоданные суточного разрешения, она была упрощена и адаптирована к более практичному месячному разрешению и меньшему количеству настраиваемых параметров. Так была разработана упрощенная имитационная модель VS-Lite (Tolwinski-Ward et al. 2011). Модель VS-Lite, возможно, является наилучшей существующей моделью для изучения характера нелинейной реакции роста деревьев в регионах, где ежедневные климатические данные и полевые наблюдения недоступны или ограничены (Lavergne et al. 2015). С момента применения этой модели для моделирования глобальной сети древесно-кольцевых хронологий (Breitenmoser et al. 2014) она становится все более популярной для моделирования роста деревьев в различных лесных экосистемах по всему миру (например, Björklund et al., 2019; Matskovsky et al., 2019; Zeng et al., 2019). В данной главе модель VS-Lite используется для прогнозов прироста деревьев при различных сценариях выбросов углекислого газа в атмосферу (сценарий 2.6: «увеличение с последующим снижением» и сценарий 8.5: сценарий «текущие скорости увеличения выбросов») для пород *N. macrocarpa* и *A. chilensis* в центральной части Чили с использованием выходных данных региональных, континентальных и глобальных климатических моделей. Затем описанная методология применяется и к другим регионам для проведения сравнительного анализа результатов. Ожидается, что эти прогнозы уточнят имеющиеся знания об уязвимости лесов центрального региона Чили к изменению климата, что поможет в разработке новых стратегий управления и сохранения лесных массивов в регионе.

## 8.2 Материалы и методы

### 8.2.1 Район исследования и особенности исследованных пород деревьев

Район исследования расположен в регионе распространения средиземноморских лесов Центрального Чили между 32°57' и 34°51' ю.ш. и 71°07' и 70°40' з.д. (рис. 8.1). Это район типичного средиземноморского климата, характеризующимся дождливой зимой (с июня по июль) и характерным засушливым средиземноморским летом (с декабря по март). Из-за орографического увеличения количества осадков среднегодовое количество осадков колеблется от примерно 300 мм в прибрежном секторе до примерно 1000 мм в высокогорных районах Анд (Viale and Garreaud 2015). Межгодовые колебания количества осадков высоки и сильно зависят от фазы ЭНЮК, при этом положительные (отрицательные) аномалии температуры поверхности в центральной экваториальной части

Тихого океана ассоциированы с влажными (сухими) условиями в центральной части Чили (Montecinos and Aceituno 2003). Вдоль Андского хребта почвы образовались из вулканических или гранитных пород и из ледниковых отложений, классифицируются как бурые почвы со средней глубиной на склонах и большой глубиной на плоскогорьях (Villagrán 1995). Вдоль Прибрежного хребта почвы образовались из гранитных пород и слабо развиты (Donoso 1982).

Деревья *N. macrocarpa* и *A. chilensis* — единственные два эндемичных вида деревьев, произрастающие в высокогорных районах (выше 1200 м н.у.м.) центрального региона Чили (Luebert and Pliscoff 2006). *N. macrocarpa* — вид лиственных деревьев, достигающий 25 м в высоту и более 60 см в диаметре ствола на высоте груди (Gajardo 2001). Его ареал охватывает весь средиземноморский регион центрального Чили и ограничен этим регионом. *Austrocedrus chilensis* — вид хвойных, северная часть ареала которого расположена в СЛЦЧ (Castor et al. 1996). Здесь этот вид деревьев образует редкие насаждения (Cruz 2015), и здесь же представлены самые засушливые условия, в которых выживает этот вид (Schlegel 1962).

### 8.2.2 Древесно-кольцевые хронологии

Для исследования было выбрано 12 участков, по шесть для деревьев *N. macrocarpa* и *A. chilensis* вдоль широтного градиента в СЛЦЧ, представляющие собой максимальную экологическую амплитуду обоих видов в исследованном регионе. Образцы из деревьев *N. macrocarpa* были отобраны в период с апреля 2014 г. по декабрь 2017 г. Случайным образом отбиралось ~30 здоровых особей разного размера на площади ~1,0 га (2–4 керна с каждого дерева). Данные о ширине годичных колец деревьев *A. chilensis* были получены из Международного банка древесно-кольцевых данных (ITRDB, <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring>). Так как эти данные собирались в 1970-е гг., эти хронологии были обновлены до 2017 г. образцами, полученными в ходе нескольких полевых выездов в 2010-е гг., а также были добавлены новые хронологии (табл. 8.1, Muñoz et al., 2017). Образцы из деревьев *A. chilensis* первоначально были отобраны в соответствии с дендроклиматической стратегией, при которой обычно отбираются доминантные отдельно стоящие деревья. Большинство древостоев, из которых были отобраны образцы, в настоящее время имеют охранный статус, так как они входят в зоны приоритетного сохранения флоры и фауны. Однако этот

охранный статус был присвоен относительно недавно, и до 1967 года большинство лесов находилось вне национальных парков и в той или иной степени подвергалось антропогенному воздействию, в частности, в результате пожаров (González et al. 2018).

Отобранные образцы древесины были высушены, приклеены к деревянным подложкам и отшлифованы. Годичные кольца деревьев были перекрестно датированы по синхронности расположения узких и широких колец (Stokes and Smiley 1968). *N. macrocarpa* имеет диффузно-пористую древесину, но распознавание границ колец облегчается наличием тонкого слоя толстостенных волокон в поздней древесине (Venegas-González et al., 2018b). Древесина *A. chilensis* состоит из трахеид, а граница годичных колец проявляется в радиальном уплощении и большей толщине клеточных стенок в поздней древесине (Roig, 1992; Rojas-Badilla et al., 2017). Ширину колец измеряли, комбинируя две методики: (i) с помощью микроскопа, установленного на полуавтоматической измерительной машине с подвижным столиком Velmex (Bloomfield, NY, USA) и (ii) с использованием программного обеспечения для обработки изображений (Rasband 1997), в обоих случаях с разрешением 0,01 мм. Мы следовали правилу Шульмана (Schulman 1956) для Южного полушария, согласно которому календарная дата кольца соответствует году начала радиального прироста. Хотя мне неизвестны исследования камбиальной активности этих видов, предполагается, что вегетационный период приходится на период с сентября по март, а месяцы с сентября по декабрь являются наиболее активной фазой вегетационного периода.

1 Таблица 8.1.

2 Основные характеристики использованных древесно-кольцевых хронологий. Ширина годичных колец (ШГК) определялась по керну,  
 3 взятому на высоте 1,3 м. Rbar: средний коэффициент корреляции для всех возможных пар рядов из отдельных кернов. СЧ: средняя  
 4 чувствительность.

Порода	Площадка	Код	Широта	Долгота	Высота (м н.у.м.)	Число деревьев/ кернов	ШГК ± СКО (мм)	RBar	СЧ	Период (годы)
<i>N. macrocarpa</i>	La Campana	PLC	32°57.7'	71°07.5'	1,280	29/47	1.34±0.88	0.35	0.45	1929-2014
<i>N. macrocarpa</i>	El Roble	SER	33°00.5'	71°01.5'	1,600	29/42	1.81±1.17	0.37	0.50	1921-2014
<i>N. macrocarpa</i>	Altos Cantillana	SAC	33°55.1'	70°58.5'	1,800	24/46	1.39±0.78	0.21	0.47	1826-2014
<i>N. macrocarpa</i>	Robleria del Cobre de Loncha	RRL	34°07.6'	70°57.9'	1,090	23/37	1.69±0.90	0.25	0.40	1890-2014
<i>N. macrocarpa</i>	Alto Huemul	SAH	34°51.9'	70°40.2'	1,550	41/56	1.39±0.73	0.26	0.39	1832-2014
<i>N. macrocarpa</i>	Parque 7 tazas	PST	35°27.9'	70°58.7'	1,318	35/61	1.37±0.75	0.25	0.39	1849-2016
<i>A. chilensis</i>	El Asiento	ELA	32°38.9'	70°48.6'	1878	54/105	0.64±0.36	0.27	0.30	884-2017
<i>A. chilensis</i>	San Gabriel	GAB	33°46.2'	70°15.0'	1,480	40/65	0.44±0.25	0.40	0.26	1131-1975
<i>A. chilensis</i>	El Baule	ELB	34°29.3'	70°26.3'	1813	46/72	0.58±0.31	0.45	0.25	1540-2011
<i>A. chilensis</i>	Santa Isabel	ISA	34°46.7'	70°45.0'	1,302	40/77	0.65±0.41	0.44	0.21	1568-1975
<i>A. chilensis</i>	Alto de las Mesas	MES	34°55.2'	70°42.0'	2,520	19/19	1.99±0.97	0.53	0.24	1796-1975
<i>A. chilensis</i>	Las Animas	ANI	35°54.5'	71°16.7'	509	18/34	1.89±0.93	0.23	0.26	1879-2017
<b><i>N. macrocarpa</i></b>	<b>Региональная</b>	<b>NOMA</b>	<b>32.5°-35.5°</b>	<b>70.5°-71.5°</b>	<b>1,280-1,800</b>	<b>181/350</b>	<b>1.64±0.91</b>	<b>0.19</b>	<b>0.43</b>	<b>1826-2016</b>
<b><i>A. chilensis</i></b>	<b>Региональная</b>	<b>AUCH</b>	<b>32.5°-35.5°</b>	<b>70.5°-71.5°</b>	<b>509-2,520</b>	<b>217/372</b>	<b>0.80±0.42</b>	<b>0.27</b>	<b>0.26</b>	<b>884-2017</b>

Качество измерений и перекрестного датирования было проверено с помощью программы COFESHA (Holmes et al. 1986). Все измерения ширины годичных колец были стандартизированы с помощью программы ARSTAN v44h (Cook 1985). Возрастные тренды были удалены из каждой серии измерений с использованием отрицательной экспоненциальной функции, функции Хугерсхоффа или линейной функции, выбор подходящей аппроксимации производился визуально (Cook et al. 1990). Полученные индексы были усреднены с использованием двухвесового робастного среднего для получения региональной хронологии для каждого вида деревьев (Cook et al. 1990).

### **8.2.3 Описание модели VS-Lite**

#### *Описание модели*

VS-Lite представляет собой упрощенную версию модели Ваганова-Шашкина (Vaganov et al. 2011). Полное описание модели и байесовского алгоритма оценки параметров модели VS-Lite 2.3 доступно по адресу (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/softlib/softlib.html>, Tolwinski-Ward et al., 2013, 2011). Модель воспроизводит индексы прироста годичных колец в соответствии с принципом лимитирующих факторов, при этом в качестве входных данных используются географическая широта, среднемесячные температуры и месячные суммы осадков. Представление отдельных камбиальных клеток и управляющих их делением и ростом биологических процессов, являющимися важными компонентами полной модели Ваганова-Шашкина, отсутствуют в модели VS-Lite. Однако нелинейный климатический контроль радиального прироста деревьев представлен в VS-Lite в виде пороговых функций отклика прироста и в реализации принципа лимитирующих факторов (Fritts 1976), как и в модели Ваганова-Шашкина

Влажность почвы в модели VS-Lite оценивается по данным о температуре и осадках с помощью эмпирической однослойной гидрологической модели (Fan and van den Dool 2004). Эта гидрологическая схема оценивает эвапотранспирацию, поверхностный сток и поток грунтовых вод как эмпирические функции входных данных и вычитает их из поступающих осадков и остаточной влажности почвы за предыдущий месяц для расчета текущей влажности почвы (Tolwinski-Ward et al. 2011). Наличие снега в модели не учитывается, поэтому все осадки предполагаются жидкими. Сезонная инсоляция или

продолжительность дня определяются по географической широте и не меняются. Для каждого года модель имитирует стандартизированные аномалии ширины годовых колец по минимуму реакции прироста на температуру ( $gT$ ) и влажность ( $gM$ ) за каждый месяц, модулированные инсоляцией ( $gE$ ).

### *Реализация модели*

В данном исследовании для большинства настраиваемых параметров модели (например, влажности почвы, стока, глубины корней) были установлены значения по умолчанию, предложенные в работе (Tolwinski-Ward et al. 2011). Функции отклика прироста на температуру ( $gT$ ) и влажность почвы ( $gM$ ) в модели VS-Lite используют два настраиваемых параметра: пороги температуры ( $T1$ ) или влажности ( $M1$ ), ниже которых рост не происходит, и оптимальная температура ( $T2$ ) или влажность ( $M2$ ), выше которых прирост является постоянным и не зависит от климатических параметров. В отличие от полной версии модели Ваганова-Шашкина, VS-Lite не имеет верхних порогов в функциях отклика прироста, выше которых влияние температуры и влажности становится отрицательным. Параметры модели были оценены для каждой хронологии с помощью байесовской калибровки, в каждом случае модель была запущена 15 000 раз методом Монте-Карло с использованием трех параллельных Марковских цепей с равномерным априорным распределением для каждого параметра и ошибкой, заданной в виде гауссовского шума (Tolwinski-Ward et al. 2013). В качестве итоговой оценки параметра использовалась медиана апостериорного распределения. Для вычисления ширины годовых колец модельные темпы роста (т. е. минимум ежемесячных значений  $gT$  и  $gM$ , умноженных на  $gE$ ) интегрировались за период между мартом предыдущего года и июнем текущего года. Для калибровки модели использовались среднемесячные данные о температуре и осадках сеточного архива CRU TS 4.00 (Harris et al. 2020). Данные имеют пространственное разрешение  $0,5 \times 0,5$  градуса и начинаются в 1901 году. Данные всех непустых узлов сетки из квадрата ( $32,25$ – $36,25^\circ$  ю.ш.,  $70,25$ – $71,25^\circ$  з.д.), включающего все исследованные площадки, были усреднены. Интервал анализа был разделен на два равных временных отрезка по 56 лет (1901–1957 гг., 1958–2014 гг.). Период 1901–1957 гг. был использован для калибровки модели, а период 1958–2014 гг. для проверки. Затем произведена замена периодов с калибровкой на периоде 1958–2014 гг. и валидацией на периоде 1901–1957 гг. Наконец, модель была откалибрована на полном периоде 1901–

2014 гг. и запущена с использованием параметров, оцененных на калибровке для моделирования хронологии годичных колец, представляющей собой оценку изменений прироста деревьев под влиянием климатических изменений.

#### **8.2.4 Оценка влияния климата на прирост**

Взаимосвязь между климатом и приростом оценивалась за период 1901–2014 гг. двумя взаимодополняющими методами: (1) с помощью корреляционного анализа (Fritts 1976) и (2) с помощью анализа модельных значений частных скоростей прироста по влажности почвы и температура на основе VS-Lite. Поскольку метеорологические условия предыдущего года могут влиять на прирост в следующем (Fritts 1976), корреляции оценивались по климатическими данным с января года, когда началось формирование годичного кольца по апрель года, когда формирование кольца закончилось. Предыдущие исследования показали, что зимние и весенние месяцы (с мая по октябрь) наиболее важны для формирования древесины в СЛЦЧ (Le Quesne et al., 2006; Venegas-González et al., 2018b). Корреляции были рассчитаны с использованием программного обеспечения dplR (Bunn and Korpela 2017) статистической среды R.

#### **8.2.5 Прогнозирование прироста**

Прогнозы прироста деревьев были рассчитаны на основе ежемесячных значений температуры и осадков из выходных данных 35 климатических моделей, в том числе моделей CMIP5, региональной модели CORDEX для Южной Америки и региональной модели RegCM4 для Чили. Область для осреднения данных была выбрана как прямоугольник, включающий расположение всех древесно-кольцевых хронологий. Были использованы два сценария из Пятого оценочного доклада МГЭИК (IPCC 2014): сценарий 8.5, который соответствует современным темпам увеличения выбросов углекислого газа в атмосферу, и сценарий 2.6, в котором увеличение выбросов уменьшается до середины 21 века и затем снижаются (Pachauri et al. 2014). Эти сценарии приводят к повышению температуры в выбранном региона к 2065 г. на  $\sim +2,0^{\circ}\text{C}$  (сценарий 8.5) и  $\sim +0,5^{\circ}\text{C}$  (сценарий 2.6) соответственно (рис. 8.2).



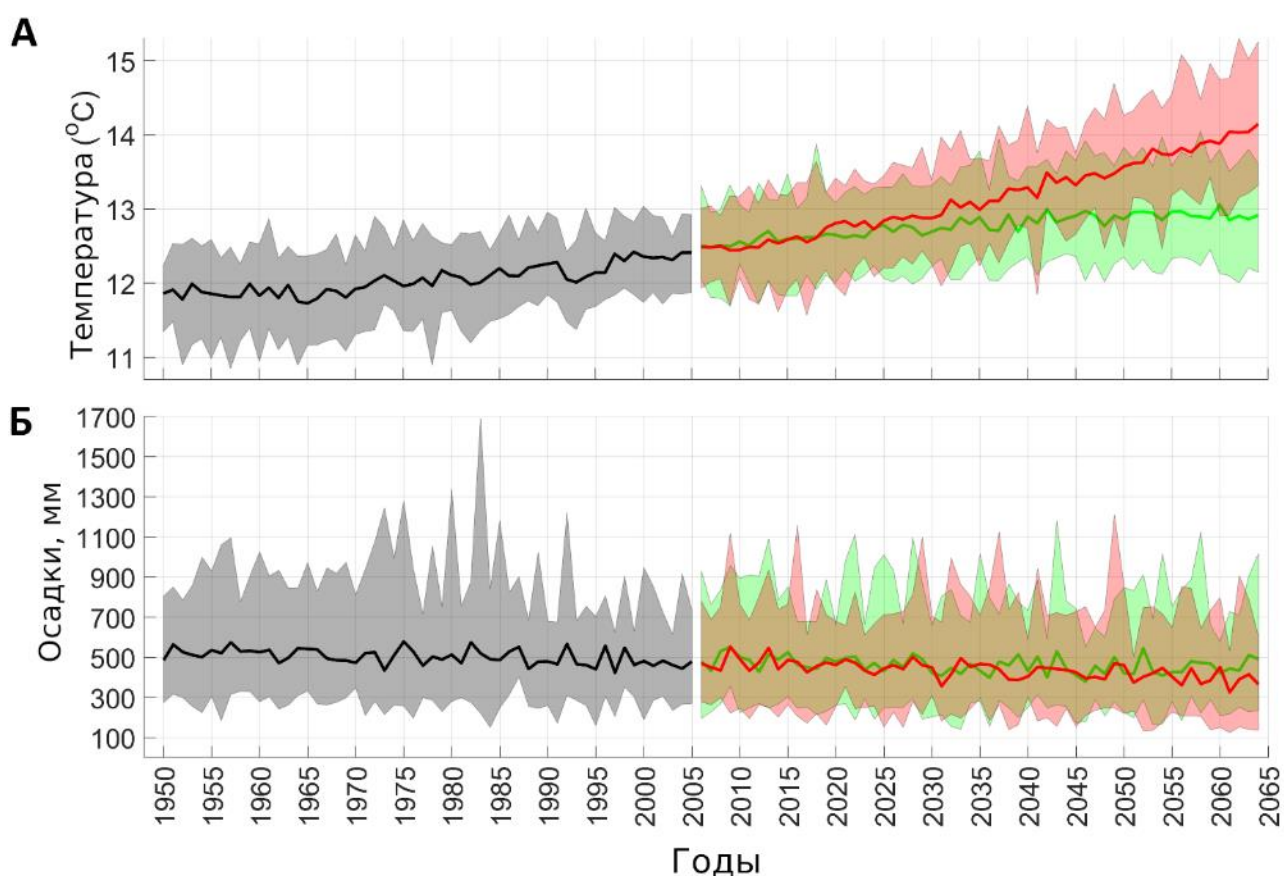


Рисунок 8.2 – Прогноз климата центральной части Чили ( $32\text{--}35^\circ\text{ю.ш.} - 70,5\text{--}71,5^\circ\text{з.д.}$ ). А – температура, Б – осадки. Черный цвет – исторический период, зеленый – сценарий 2.6, красный – сценарий 8.5. Затенение показывает максимальные и минимальные значения для всех сценариев; жирными линиями показаны средние проекции для ансамбля.

Для осадков к 2065 г. наблюдается заметное уменьшение их годовых сумм ( $\sim 20\%$ ). Эти результаты в целом согласуются с выводами, опубликованными в работе (Bozkurt et al. 2018). Выходные данные климатических моделей, усредненные для исследуемого региона, были загружены с веб-сайта (<http://simulaciones.cr2.cl/>). Они были скорректированы в соответствии с инструментальными данными CRU TS для той же пространственной области: сначала данные CRU TS усреднялись по всем узлам сетки, попадающим в исследуемую область; затем данные климатических моделей были скорректированы, чтобы соответствовать среднему значению данных CRU TS за общий период покрытия CRU TS и «исторического» периода моделирования (1950–2005 гг.). У температуры также было скорректировано стандартное отклонение. Эти корректировки выполнялись отдельно для каждого месяца года. Затем скорректированные данные климатических прогнозов

подавались на вход настроенной модели VS-Lite, откалиброванной по региональной хронологии каждого вида деревьев. Таким образом, был получен ансамбль прогнозируемых радиальных приростов для каждого вида деревьев. Эти ансамбли использовались для оценки среднего и разброса. Модельный прирост был рассчитан для исторического периода 1950–2005 гг. и для прогнозного периода 2006–2065 гг. по выходным данным климатических моделей. Прогнозный период был разделен на четыре 15-летних периода: современный (2006–2020 гг.), ближайшее (2021–2035 гг.), скорое (2036–2055 гг.) и отдаленное будущее (2056–2065 гг.). Различия между результатами моделирования для периодов оценивались с помощью апостериорного критерия Фишера.

### **8.3. Результаты**

#### **8.3.1 Калибровка и валидация модели VS-Lite**

Результаты оценки качества моделирования VS-Lite представлены в таблице 8.2. Коэффициенты корреляции между модельным и измеренным годовым приростом деревьев статистически значимы ( $p < 0,05$ ) для всех экспериментов. Результаты существенно не изменились при обмене периода калибровки с периодом проверки (таблица 8.2). Интересно, что модельные приросты деревьев *N. macrocarpa* и *A. chilensis* очень похожи ( $r = 0,99$ ), хотя корреляция между измеренными приростами, выраженными в региональных хронологиях этих видов также достаточно высока ( $r = 0,59$ ) (рис. 8.3). Эти результаты, вместе с результатами анализа климатического отклика обоих видов деревьев, представленных в следующем разделе, говорят о схожих климатических факторах, влияющих на прирост деревьев обоих видов.

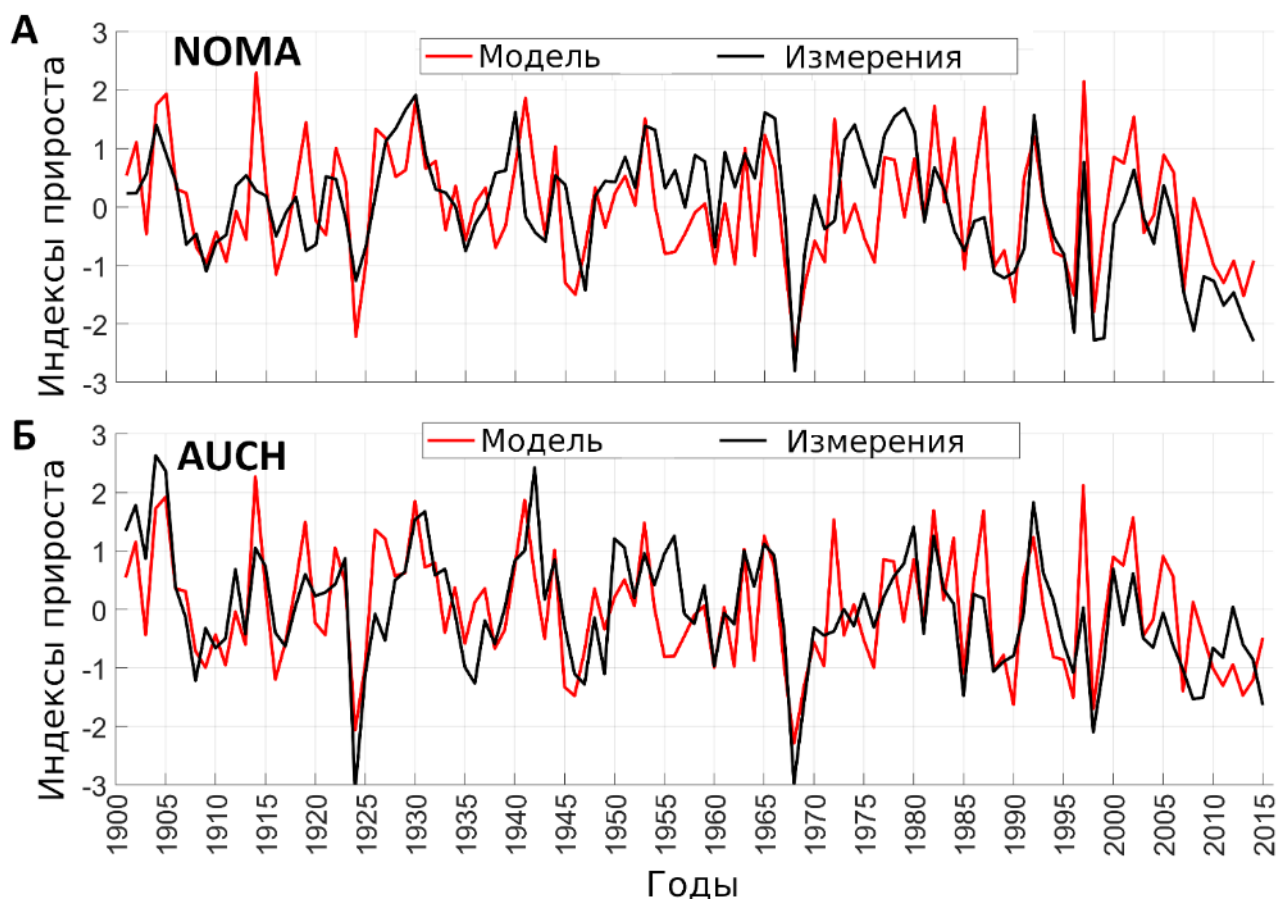


Рисунок 8.3 – Результаты калибровки и валидации модели VS-Lite для А – *N. macrocarpa* (NOMA,  $r = 0,59$ ) и Б – *A. chilensis* (AUCH,  $r = 0,69$ ) за период 1901–2014 гг.

Таблица 8.2

Калибровка и валидация модели VS-Lite. Показаны коэффициенты корреляции между модельными и измеренными значениями.

Порода	1901-1957		1958-2014		1901-2014
	калибровка	валидация	калибровка	калибровка	калибровка
<i>N. macrocarpa</i>	0.52	0.52	0.63	0.57	0.59
<i>A. chilensis</i>	0.69	0.68	0.70	0.63	0.69

### 8.3.2 Влияние климата на прирост на основе моделирования VS-Lite

Климатический отклик региональных хронологий *N. macrocarpa* и *A. chilensis* показал сходные черты. Оба вида деревьев имеют самые высокие положительные корреляции с осадками в зимние месяцы перед вегетационным периодом и самые высокие отрицательные корреляции с температурой в вегетационный период с ноября по февраль (рис. 8.4 А, Б). В частности, было обнаружено, что самые влажные месяцы определяют прирост деревьев у обоих видов, что особенно проявляется у *A. chilensis* с мая по август ( $r \sim 0,40$ ,  $p < 0,01$ ), а у *N. macrocarpa* с мая по июль ( $r \sim 0,30$ ,  $p < 0,05$ ). Это согласуется с ярко выраженной сезонностью осадков в регионе исследования (в летние месяцы дождей почти не бывает). Что касается влияния средней температуры воздуха, наблюдается сильная отрицательная корреляция между радиальным приростом и температурой ноября у обоих видов. Более сильный климатический отклик *A. chilensis* по сравнению с *N. macrocarpa* подтверждается более высокими коэффициентами корреляции с климатическими параметрами (рис. 8.4 А, Б), а также более высокими коэффициентами корреляции между наблюдаемым и модельным приростом деревьев (рис. 8.3, табл. 8.2).

Частные темпы прироста по температуре и влажности почвы, полученные на основе моделирования VS-Lite, показывают, что для обоих видов в течение большей части года основным ограничивающим фактором прироста является влажность почвы (рис. 8.4 В, Г). Лишь в июле и августе, самых холодных месяцах, лимитирующим фактором становится температура. В целом, результаты анализа климатического отклика и моделирования VS-Lite показывают, что влажность почвы, зависящая от осадков зимнего и весеннего сезона и испарением весеннего и летнего сезона, является основным лимитирующим фактором радиального прироста *A. chilensis* и *N. macrocarpa* в регионе исследования.

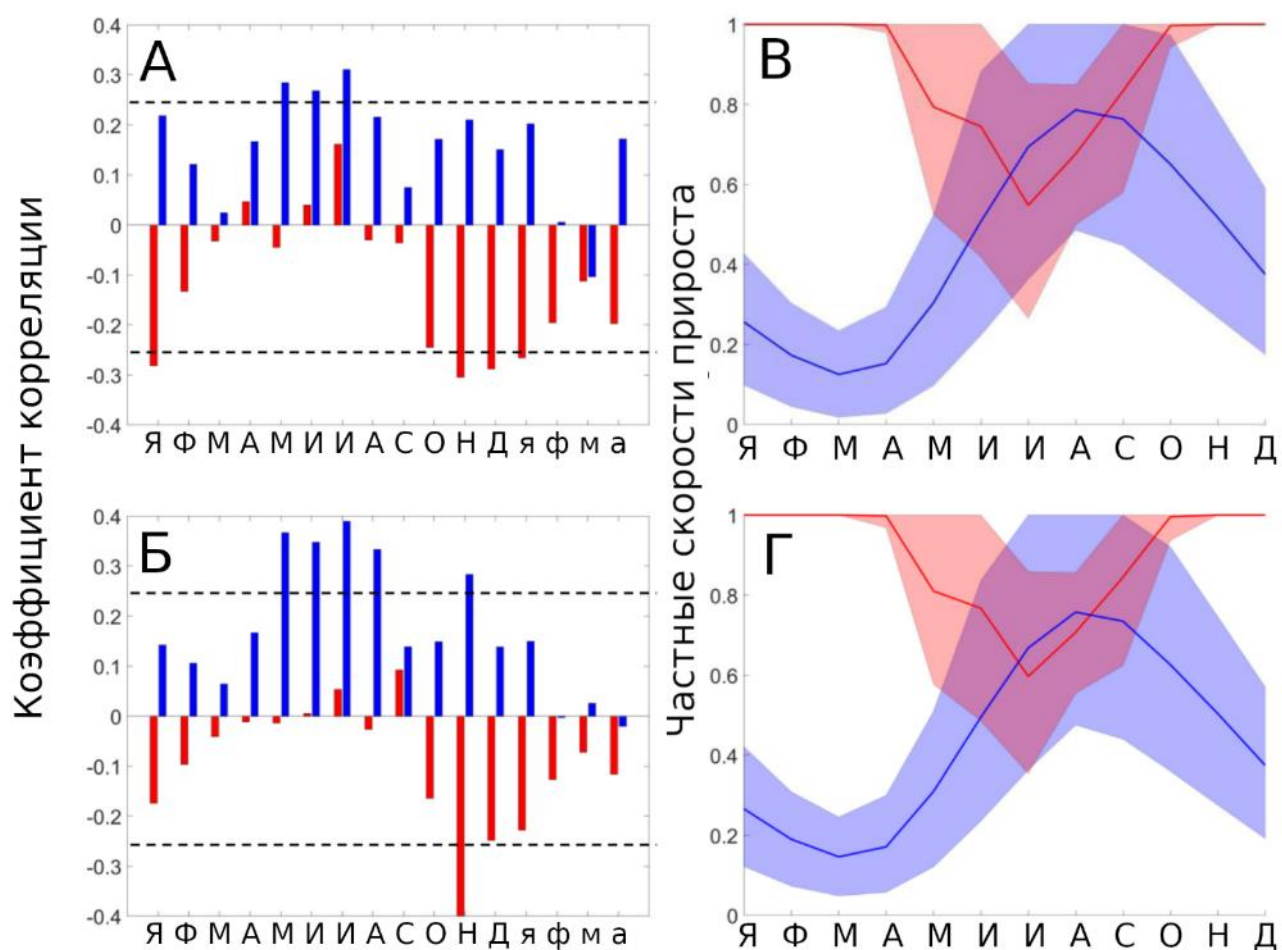


Рисунок 8.4 – Взаимосвязь прироста и климата на основе корреляционного анализа (А, Б) и моделирования VS-Lite (В, Г) за период 1901–2014 гг. Пунктирные горизонтальные линии указывают статистическая значимость ( $p < 0,05$ ). На панелях (В, Г) показаны месячные частные темпы прироста, обусловленные влажностью почвы (gM, синий) и температурой (gT, красный). Полупрозрачной заливкой показаны 2,5 и 97,5 процентиля, жирной линией - медиана. Результаты для *Nothofagus macrocarpa* показаны вверху (А, В), для *A. chilensis* внизу (Б, Г). Значения параметров gM и gT близкие к 1 указывают на отсутствие климатических ограничений прироста.

### 8.3.3 Прогнозы прироста

Было проведено сравнение наблюдаемого (1901–2014 гг.) и смоделированного (1950–2065 гг.) прирост деревьев *N. macrocarpa* и *A. chilensis* (рис. 8.5). Результаты моделирования радиального прироста в прошлом и будущем практически идентичны для двух видов деревьев, что неудивительно, учитывая, что они происходят из одного и того же

климатического региона (рис. 8.1) и имеют сходный климатический отклик (рис. 8.4), а также тот факт, что модель VS-Lite учитывает только климатически обусловленный прирост деревьев. Поэтому прогнозные значения прироста далее рассматриваются вместе для двух пород. Статистически значимые изменения среднего прироста деревьев по ансамблю в сценариях 8.5 и 2.6, были обнаружены для всех подпериодов прогноза по сравнению с историческим периодом (рис. 8.6).

Для сценария 2.6 наблюдается значимое снижение прироста начиная с периода 2036–2050 гг. При более экстремальной сценарии 8.5 ситуация еще более драматична, поскольку расчетный прирост деревьев снижается гораздо быстрее и становится значимо ниже современного прироста уже начиная с ближайшего периода 2021–2035 гг. Средний прогнозируемый прирост деревьев в далеком будущем (2051–2065 гг.) согласно сценарию 8.5 соответствует 21-й перцентили моделируемого прироста деревьев за инструментальный период (1901–2015 гг.), т.е. ниже 79% всех значений за этот период (табл. 8.3). Кроме того, начиная с периода 2036–2050 гг. существует статистически значимая разница между прогнозами прироста согласно сценариям 2.6 и 8.5, с более низкими оценками прироста для последнего.

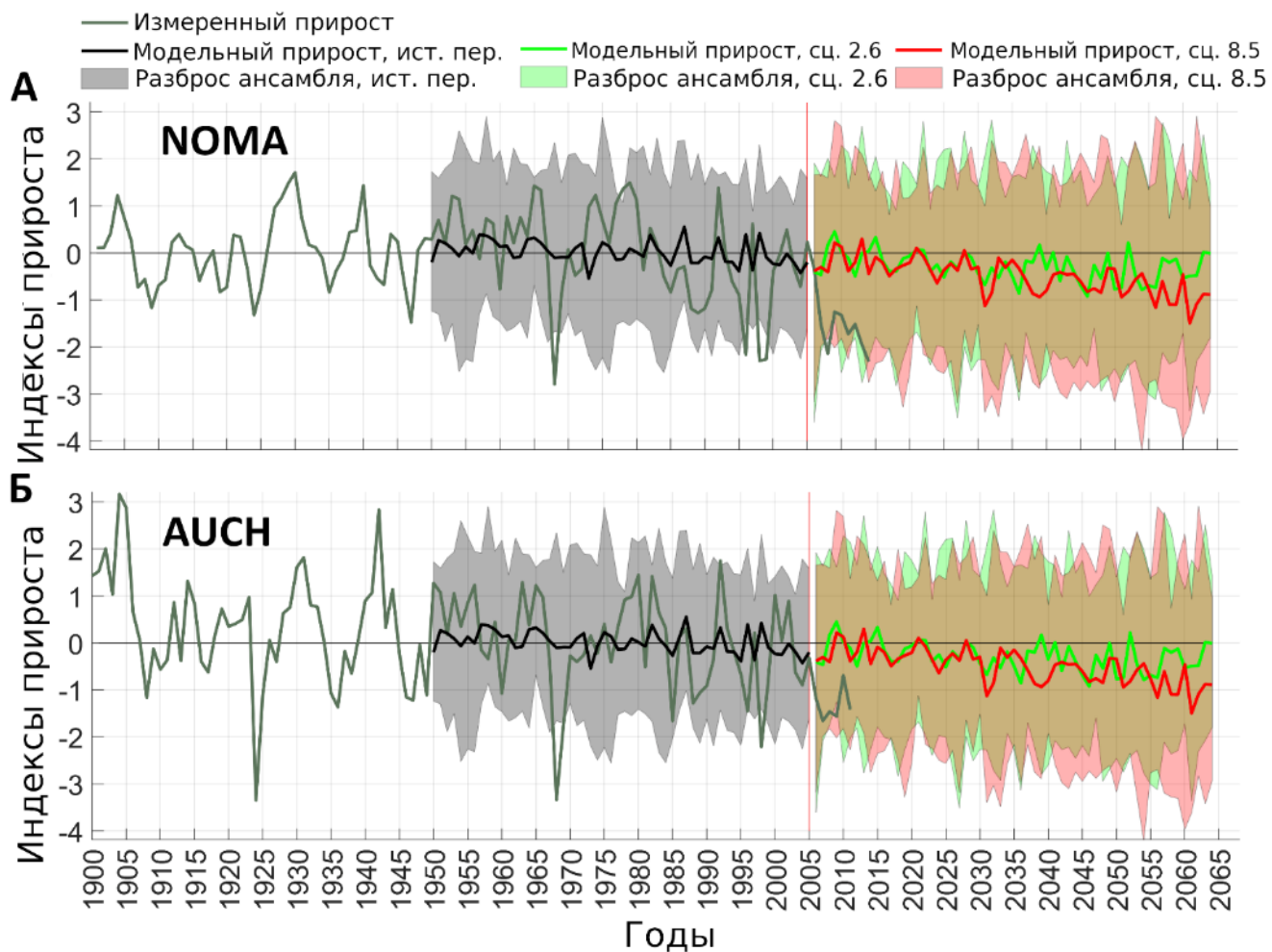


Рисунок 8.5 – Измеренные и смоделированные индексы годовичных колец для двух изученных видов по двум сценариям МГЭИК. А – *Nothofagus macrocarpa* (NOMA), Б – *Austrcedrus chilensis*. Смоделированный рост за исторический период не обязан воспроизводить годовую динамику наблюдаемого прироста, так как он рассчитан по выходным данным климатических моделей. В то же время большая часть наблюдаемых значений прироста находится внутри разброса значений ансамбля. *N. macrocarpa* и *A. chilensis* неразличимы с точки зрения модельного прироста.

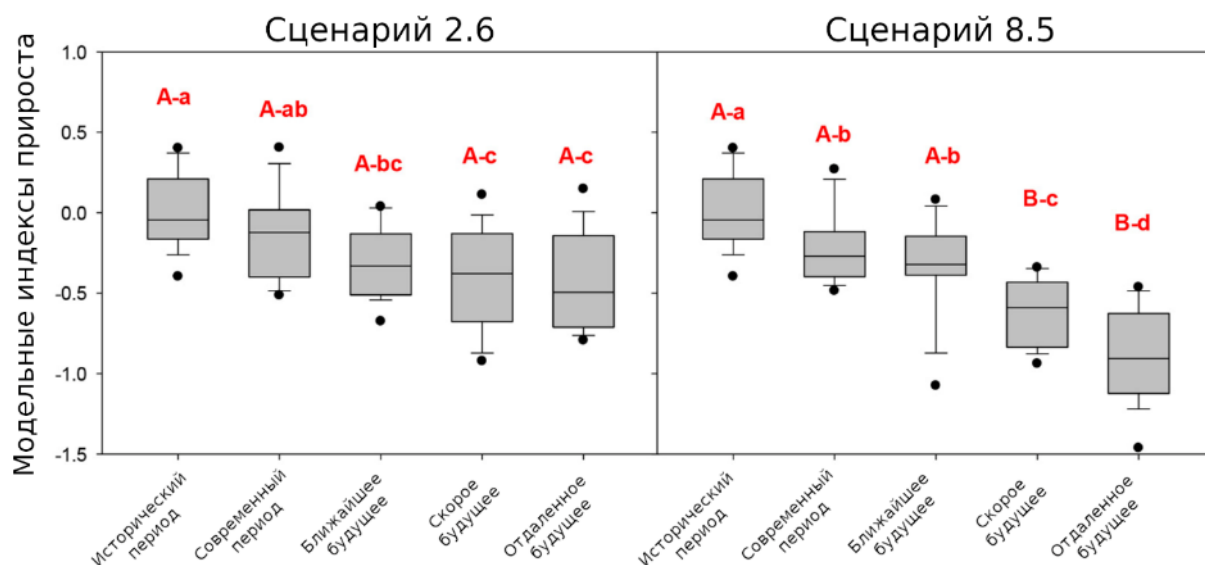


Рисунок 8.6 – Различия между прогнозируемыми приростами деревьев в 15-летние периоды для двух климатических сценариев: 2.6 (слева) и 8.5 (справа). Исторический период – 1950–2005 гг., современный период – 2006–2020 гг., ближайшее будущее – 2021–2035 гг., скорое будущее – 2036–2050 гг., отдаленное будущее – 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.



Таблица 8.3.

Описательная статистика прогнозируемого прироста согласно сценариям 2.6 и 8.5.

<b>Сценарий и период</b>	<b>Среднее (СКО)</b>	<b>Мин</b>	<b>Макс</b>	<b>Медиана</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>Процентиль*</b>
<u>Сценарий 2.6</u>							
Современный период 2006-2020 гг.	-0.14 (0.28)	-0.53	0.42	-0.15	-0.42	0.01	
Ближайшее будущее 2021-2035 гг.	-0.29 (0.23)	-0.74	0.03	-0.28	-0.47	-0.09	45
Скорое будущее 2036-2050 гг.	-0.39 (0.32)	-0.95	0.14	-0.39	-0.64	-0.12	42
Отдаленное будущее 2051-2065 гг.	-0.43 (0.32)	-0.81	0.17	-0.51	-0.76	-0.15	40
<u>Сценарий 8.5</u>							
Современный период 2006-2020 гг.	-0.14 (0.32)	-1.13	0.07	-0.34	-0.41	-0.12	
Ближайшее будущее 2021-2035 гг.	-0.36 (0.28)	-0.53	0.42	-0.15	-0.42	0.01	48
Скорое будущее 2036-2050 гг.	-0.61 (0.24)	-0.97	-0.18	-0.59	-0.86	-0.43	30
Отдаленное будущее 2051-2065 гг.	-0.88 (0.32)	-1.53	-0.39	-0.91	-1.12	-0.61	21

\*среднее значение прогнозного прироста деревьев за рассмотренный период соответствует этой процентили распределения модельных значений за инструментальный период (1901–2015 гг.)

## 8.4 Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, 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. Предыдущие исследования показали чувствительность прироста деревьев к изменчивости климата в центральной части Чили с использованием экологических оценок (например, Gutierrez et al., 2008) и дендроклиматических реконструкций (Le Quesne et al., 2009, 2006), но прогнозы прироста деревьев в будущем для этого региона ранее не предоставлялись. Высокая чувствительность радиального прироста изучаемых древесных пород к изменчивости климата в СЛЦЧ дает надежную основу для определения уровня уязвимости этих экосистем к грядущим изменениям климата. Кроме того, новизна проведенного исследования заключается в том, что в нем рассматривается региональная хронология для всего естественного ареала *N. macrocarpa*, который является самым северным видом рода *Nothofagus*. Также рассмотрена самая северная часть популяции *A. chilensis* как в Прибрежных горах, так и в Андах (Armesto et al. 2007). Таким образом, полученные результаты позволяют получить актуальную информацию об уязвимости горных лесов экосистемы средиземноморского типа Южной Америки к изменению климата.

### 8.4.1 Климатический отклик ДКХ в центральном регионе Чили

Хотя использованные древесно-кольцевые хронологии расположены в разных локациях, включая различные микроклиматические условия и местообитания, все деревья имеют сходную динамику прироста, а обобщенные региональные хронологии для обеих пород показывают сходную реакцию на изменчивость климата. Увеличение количества осадков в течение зимы (в основном с июня по август) в сочетании с умеренными летними температурами стимулируют большую вегетационную активность у обоих видов (рис. 8.4 А, Б). Это свидетельствует о том, что зимние осадки создают благоприятные условия для запасания почвенной влаги до и после начала камбиальной деятельности (примерно в октябре), а жаркий весенне-летний период сдерживает рост деревьев, скорее всего, за счет увеличения эвапотранспирации. Это связано с сезонностью осадков в регионе, а именно с большим количеством осадков в холодные зимние месяцы и недостатком осадков в самые жаркие летние месяцы. Здесь важно отметить, что частные скорости

прироста по влажности почвы, смоделированные в VS-Lite (рис. 8.4 В, Г), также указывают на отрицательный отклик на температуру, поскольку потеря влаги из-за испарения в модели рассчитывается именно на основе температуры.

#### **8.4.2. Современная и будущая изменчивость климата в центральном регионе Чили и ее последствия для лесов**

Наиболее выраженное повышение температуры в Чили было выявлено на больших высотах (Viale and Garreaud 2015), что привело к повышению высоты расположения нулевой изотермы, что повлияло на вклад снега в подпитку водоносного горизонта и почвы (Carrasco et al. 2008). Это также повлияло на уменьшение размера и объема ледников Анд (Dussailant et al. 2019), что привело к уменьшению стока горных рек, и сделало зависящие от них экосистемы и сообщества более уязвимыми (Ragettli et al. 2016). Это региональное явление уменьшения водной доступности усугубляется уменьшением количества снегопадов в Андах. Изменения вклада снега в увлажнение почвы может еще больше усложнить прогноз прироста в связи со сложными связями влияния снежного покрова и температуры на прирост в горах (Grigoriev et al. 2022). В работе (Boisier et al. 2016) приводятся аргументы в пользу того, что до четверти дефицита осадков за последнее десятилетие связано с антропогенным изменением климата, выражающимся в изменении циркуляции в средних и высоких широтах Южного полушария. Эти изменения, вызванные продолжительной умеренной фазой Ла-Нинья, привели к менее активному фронтогенезу и спровоцировали многолетнюю засуху беспрецедентного масштаба в новейшей истории по обе стороны центральных Анд (Rivera et al. 2017; Garreaud et al. 2019). Засуха повлияла на растительность (Garreaud et al. 2017), рост лесов (Venegas-González et al. 2019) и урожаи сельскохозяйственных культур (Zambrano et al. 2016). Продолжающееся потепление в последние десятилетия в центральной части Чили (Vuille et al. 2015) еще больше усилило тенденцию к снижению прироста лесов (Venegas-González et al., 2018b), особенно во время мегазасухи 2010-х годов (Garreaud et al. 2019).

Рассмотренные прогнозы изменения климата указывают на потепление и усиление засушливости в центральной части Чили, с оценками сокращения количества осадков до 30% и повышения температуры до 3,5°C (наихудший сценарий 8.5) к концу XXI века (Bozkurt et al. 2018). В этом контексте затяжные засухи, подобные той, что происходит с начала 2010-х гг., в ближайшем будущем, вероятно, участятся (Boisier et al. 2016).

Экстремальные климатические явления были обозначены как основные факторы сокращения и гибели лесов. Они также влияют на важные экологические процессы у изучаемых видов. Например, засухи повлияли на структуру семян *Nothofagus obliqua*, доминирующей лиственной породы деревьев в равнинной части СЛЦЧ (Aguilera-Betti et al. 2017), увеличили смертность деревьев и уменьшили количество подроста. Недавние эпизоды засухи и жары были связаны с сокращением площади лесов *Nothofagus* spp. и леса *A. chilensis* в центральной части Чили и в северной Патагонии (Amoroso et al., 2015; Fajardo et al., 2019; Rodríguez-Catón et al., 2019; Venegas-González et al., 2018b). Экстремальные климатические явления имели серьезные последствия для лесов в регионе и в связи с сопутствующими факторами: увеличением дефолиации, вызванной насекомыми-вредителями, а также обширные пожары в центральной и южной частях Чили. Наблюдаемое в северной Патагонии увеличение случаев дефолиации бабочкой *Ormiscodes* в лесах *Nothofagus pumilio* также было связано с потеплением в регионе (Paritsis and Veblen 2011a; Estay et al. 2019). Это насекомое также может объедать деревья *N. macrocarpa* в центральной части Чили (Altmann and Claros 2015). Что касается пожаров, то было показано, что в лесах *A. chilensis* и *N. macrocarpa* в течение последних 1000 лет повторялись пожары низкой интенсивности, что указывает на устойчивость лесов к этому фактору (Rozas et al. 2018). Однако в последнее время взаимодействие более высокой температуры и меньшего количества осадков в течение нескольких лет подряд увеличило вероятность лесных пожаров в регионе (González et al. 2018), что все же может повысить уязвимость лесов *A. chilensis* и *N. macrocarpa*.

Полученные прогнозы радиального прироста показывают, что даже по наиболее благоприятному сценарию (сценарий 2.6) будет наблюдаться существенное снижение радиального прироста деревьев по сравнению с текущим периодом (рис. 8.6). Для экстремального сценария (сценарий 8.5) ситуация прогнозируется еще хуже, так как ожидается, что к 2065 году медианный прирост деревьев будет соответствовать нижнему квартилю наблюдаемого прироста за последнее столетие. Полученные прогнозы показывают, что популяции *A. chilensis* и *N. macrocarpa* в средиземноморских лесах центрального региона Чили будут наиболее уязвимыми к концу 21 века. Похожие прогнозы были ранее приведены и для лесов средиземноморского типа в других регионах мира (Dorado Liñán et al., 2019, Sánchez-Salguero et al. 2017).

### 8.4.3 Ожидаемое изменение растительности в реликтовых лесах центральной части Чили

Хорошо известно, что каждые на 100 м подъема в высоту происходит понижение температуры на 0,5-0,6 °C (Körner and Paulsen 2004). Следовательно, ожидается, что постепенное повышение глобальной температуры приведет к изменению условий окружающей среды, благоприятных для роста растений на каждом высотном поясе. Было подсчитано, что повышение температуры на 1 °C приведет к тому, что нынешние условия произрастания средиземноморской растительности поднимутся на 167 м и сместятся по широте более чем на 140 км по направлению к полюсу (Jump et al. 2009). Подобные изменения уже наблюдаются в различных частях мира (Moiseev et al. 2010; Devi et al. 2020; Hagedorn et al. 2020). Например, леса умеренного пояса в Испании постепенно заменяются средиземноморскими видами деревьев (Penuelas et al. 2007), а в Калифорнии при повышении температуры выше 2° прогнозируется замена кустарников пустынными лугами, а вечнозеленых хвойных деревьев смешанными вечнозелеными лесами (Наyhое et al. 2004). Согласно исследованию (Vambach et al. 2013) параметрами окружающей среды, лучше всего объясняющим распространение видов в СЛЩЧ, являются осадки и температура теплых месяцев. Есть данные, указывающие на то, что некоторые леса рода *Nothofagus* смогли адаптироваться к существованию выше в горах в связи с изменяющимися климатическими условиями. Матиасен и Премоли (Mathiasen and Premoli 2016) предполагают наличие достаточного эволюционного потенциала низкогорных генотипов *N. pumilio* для колонизации высокогорных участков. К сожалению, это не может относиться к прибрежной части ареала *N. macrocarpa*, поскольку в настоящее время они занимают самые высокие участки и не могут подниматься дальше. Это возможно только для популяций андской части ареала. Поэтому леса *Austrocedrus chilensis*, расположенные на средних высотах андского хребта, также находятся в более благоприятных условиях. В случае миграции вверх по склону, вызванных глобальным потеплением, высокогорные популяции могут уступить в этом процессе низкоуровневым, что приведет к локальному исчезновению и/или замене этих генотипов (Mathiasen and Premoli 2016)

### 8.4.4 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 важнейших климатических факторов, который не учитывается в модели VS-Lite, но который было бы полезно учитывать в будущих исследованиях, 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; Nadad et al. 2019).

Также, судя по всему, для текущей версии модели VS-Lite важен региональный масштаб проведенного исследования. В предварительных экспериментах с VS-Lite она калибровалась на уровне отдельных площадок, но в этом случае качество моделирования было ниже. Это согласуется с другими известными случаями применения модели VS-Lite для воспроизведения глобального прироста деревьев (Breitenmoser et al. 2014), в которых также качество моделирования возрастало при объединении хронологий для регионов. Это может быть связано с грубостью сеточных данных CRU TS в регионах с резкими перепадами высот на коротких расстояниях, о чем упоминалось в работе (Breitenmoser et al. 2014), а также с отсутствием настройки параметров модели для каждой площадки. Например, расчет влажности почвы, основанный на использованной в VS-Lite модели ведра, очень чувствителен к выбору параметров. В Чили влагоудерживающая способность почвы сильно различается между Прибрежным и Андским хребтами. Хорошее качество моделирования, показанное на региональном масштабе, указывает на возможность применения стандартных параметров модели для региональных исследований. Однако будущие исследования, проведенные с настройкой параметров модели для каждого

участка, могут дать больше информации о биогеографической изменчивости прироста деревьев.

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 закрытыми и, таким образом, сокращать испарение, при этом получая достаточное количество углекислого газа для фотосинтеза. Повышение эффективности использования воды деревьями было показано с помощью анализа изотопного состава углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) в годичных кольцах деревьев в различных экосистемах (Keenan et al. 2013). В разных исследованиях указывалось как на наличие положительного влияния повышения эффективности использования воды на прирост деревьев, так и на отсутствие этого эффекта (Levesque et al. 2017).

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, а иногда даже в надежности сгенерированных прогнозов. Например, (Gea-Izquierdo et al. 2017) использовали модель MAIDEN, которая учитывает водный и углеродный циклы и провели моделирование для локальных участков деревьев с использованием ежедневных климатических данных. Но они не смогли выполнить верификацию модели на независимом периоде из-за недостаточного количества данных. Следовательно, сравнительная простота модели VS-Lite также может быть преимуществом, особенно в случае ограниченной доступности данных для калибровки и верификации.

Пожалуй, 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 засушливости. 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.

#### **8.4.5 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 (рис. 8.7) и для ели европейской на Соловецких островах (рис. 8.8). 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 засушливости, несмотря на прогнозируемое повышение температуры (рис. 8.7). Прогнозируемый прирост поэтому остается на исторических уровнях, и даже несколько возрастает, если в модели задается увеличенная длина вегетационного сезона в связи с повышением температур (рис. 8.7 Г) (Matskovsky et al. 2020b).



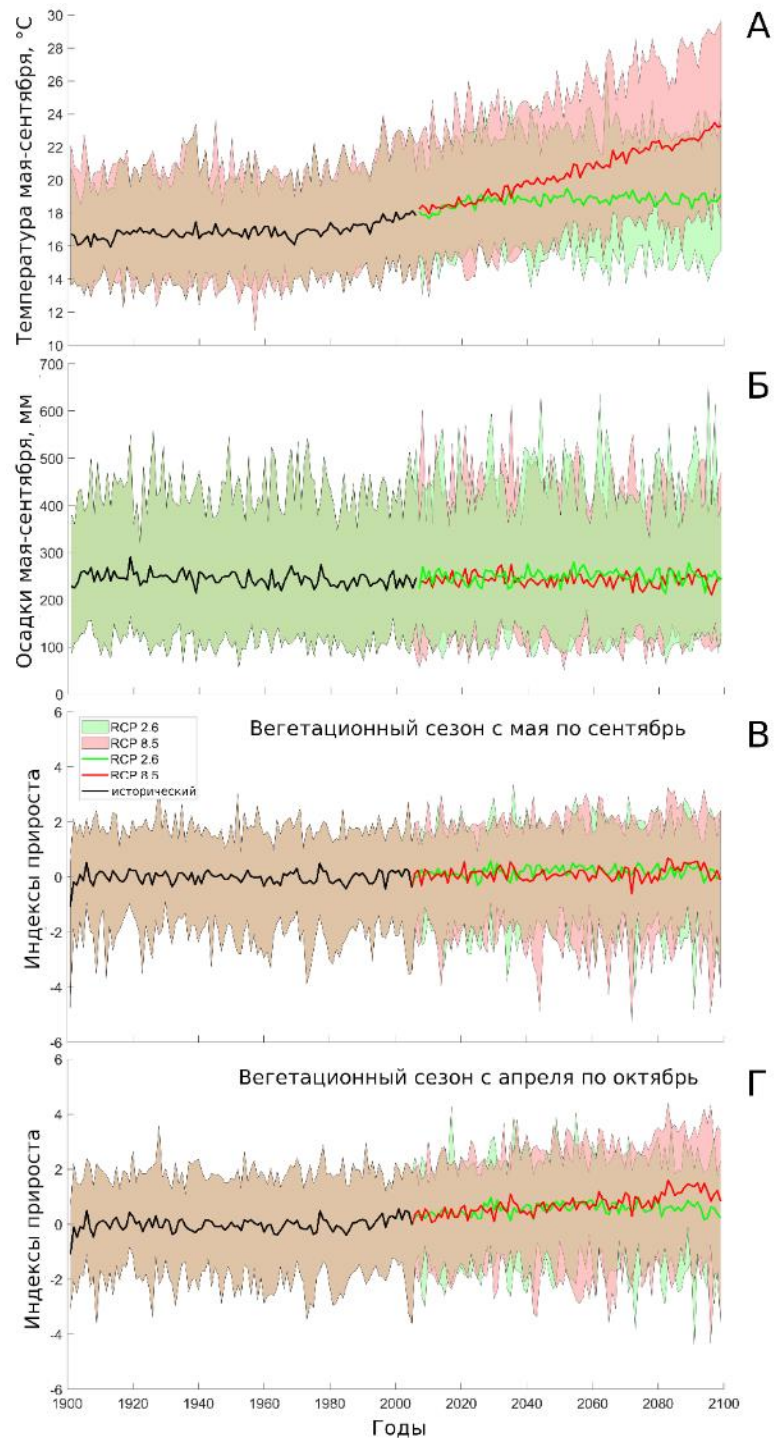


Рисунок 8.7 – Среднее и диапазоны ансамбля смоделированных средних температур мая-сентября (А), суммы осадков за май-сентябрь (Б) и индексов прироста сосны (В, Г) в восточном подрегионе Поволжья по трем сценариям: исторический, 2.6 и 8.5. На панелях В и Г приведены расчеты для разного окна интегрирования (вегетационного сезона) в модели VS-Lite.

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 (рис. 8.8) и для различных временных срезов (Matskovsky et al. 2020a). Тем не менее, как уже упоминалось в разделе 8.4.4, 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.

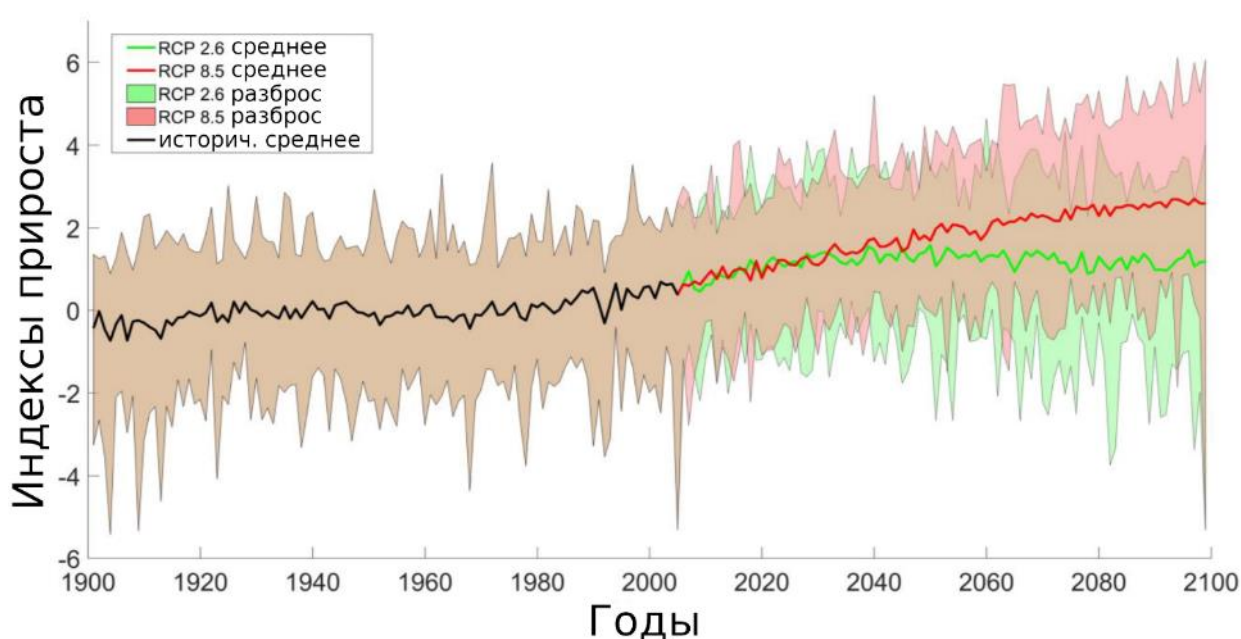


Рисунок 8.8 – Средние значения по ансамблю и диапазоны модельного прироста ели европейской по трем сценариям: исторический, 2.6 и 8.5.

Для обобщения описанной методики прогнозирования, она была применена к глобальной базе данных древесно-кольцевых хронологий, описанной в работе (Breitenmoser et al. 2014). Вначале было проведено моделирование измеренных приростов на основе модели VS-Lite и сеточного архива метеонаблюдений CRU TS 4.00. Были выделены регионы и породы, прирост которых может быть смоделирован моделью VS-Lite с достаточной степенью надежности (рис. 8.9). Затем был проведен прогноз прироста для двух сценариев 2.6 и 8.5 на основе ансамбля выходных данных моделей эксперимента CMIP5. Результаты приведены на рисунке 8.10. 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. Некоторые из них можно будет обойти посредством внесения изменений в текущую версию модели, в том числе добавления блока расчета твердых осадков и добавления новых пороговых значений для расчета влияния температуры и влажности почвы на прирост, как это сделано в полной версии модели Ваганова-Шашкина (Ваганов, Шашкин 2000).

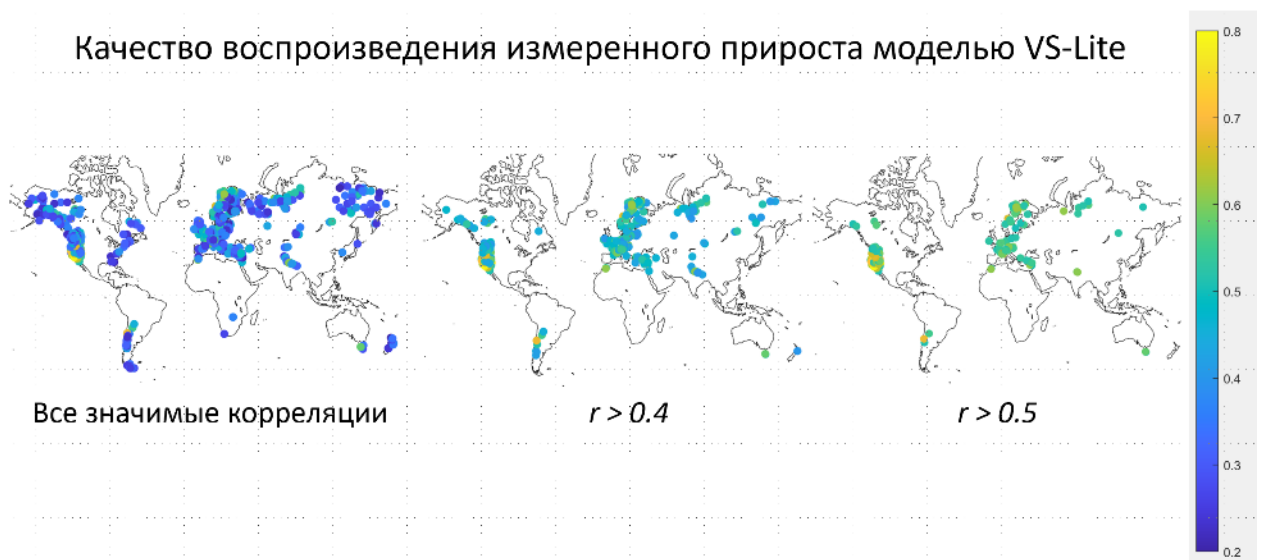


Рисунок 8.9 – Качество моделирования прироста моделью VS-Lite для глобальной сети древесно-кольцевых хронологий. Цветом показаны коэффициенты корреляции между измеренным и модельным приростом.

В связи с общей тематикой работы, еще раз хочется отметить связь долгопериодной изменчивости прироста и возможностями его прогнозирования, в том числе с помощью предложенной методики. В проведенных расчетах были получены прогнозные значения прироста, в среднем статистически значимо отличающиеся от значений, рассчитанных на инструментальном периоде наблюдений. Это говорит о прогнозировании наличия долговременных изменений в средних значениях прироста. Подобный прогноз может быть признан корректным только при условии признания возможности древесно-кольцевых

данных (в этом случае величины годичного прироста) 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.

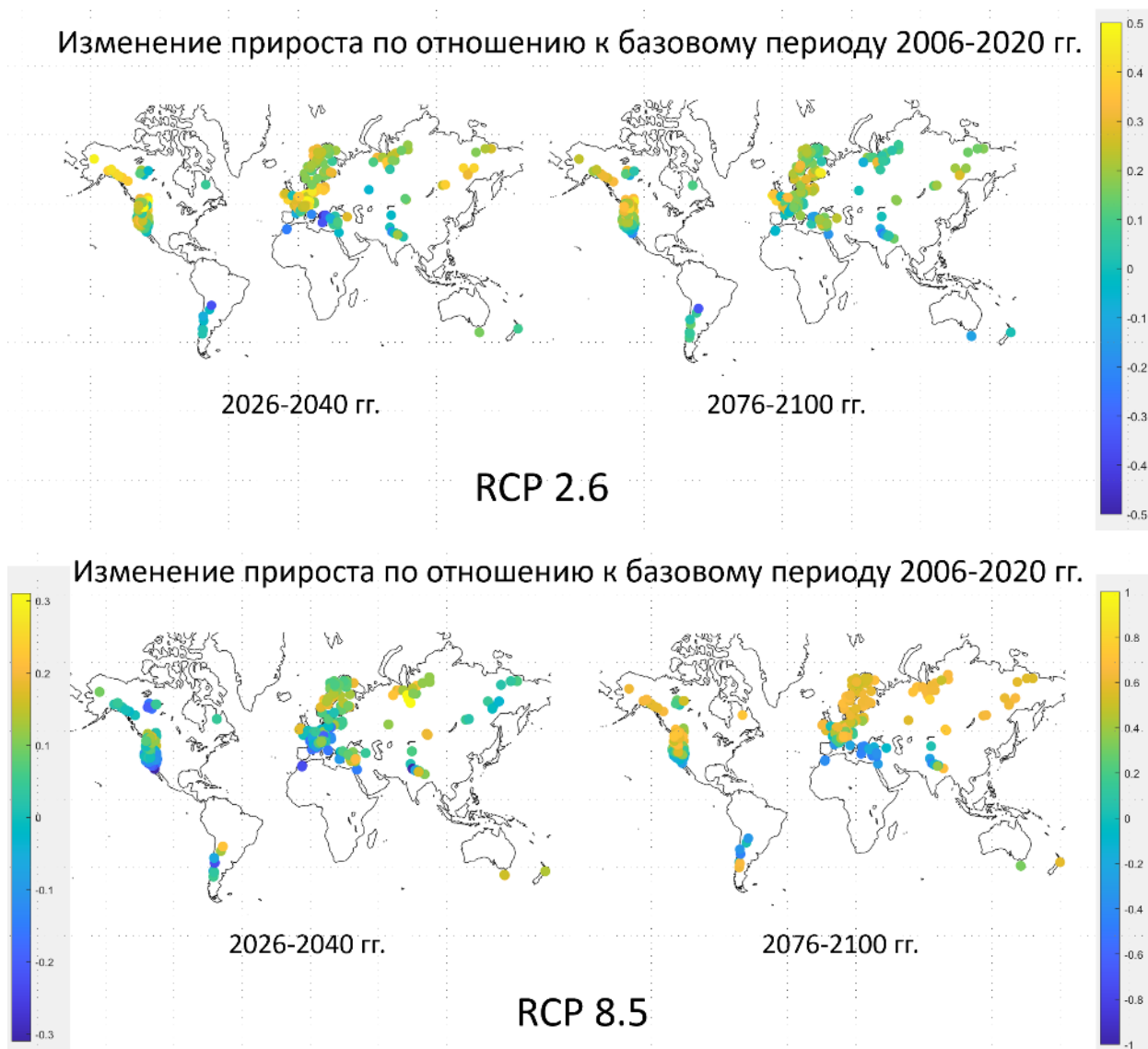


Рисунок 8.10 – Прогнозы изменения прироста на основе модели VS-Lite для глобальной сети древесно-кольцевых хронологий для сценария 2.6 (сверху) и сценария 8.5 (снизу). Цветом показано изменение модельного прироста для двух периодов: 2026–2040 гг. (слева) и 2076–2100 гг. (справа) по отношению к базовому периоду 2006–2020 гг. На нижней панели справа и слева значения для наглядности приведены в разных цветовых масштабах.

## 8.5. Выводы к главе 8

1) Представлена 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, которые не всегда легко получить на практике.

2) Результаты прогнозирования радиального прироста двух основных лесобразующих пород средиземноморских лесов центрального региона Чили на основе представленной методики показали, что они уязвимы к будущим изменениям климата как при более благоприятном, так и при более суровом сценарии климатических изменений, причем для последнего прогнозируемые изменения являются критическими на конец прогнозного периода.

3) Методика была опробована еще для нескольких пород деревьев и географических регионов прежде, чем была применена к глобальной базе древесно-кольцевых хронологий. Это помогло выявить основные ограничения методики, а также оценить основные паттерны глобального изменения прироста в будущем для нескольких сценариев и различных временных срезов.

4) Представленная методика имеет ряд ограничений, причем одним из важнейших является отсутствие имплементации пороговых значений климатических параметров, после пересечения которых рост дерева замедляется или прекращается. Также в текущей версии модели отсутствует возможность учета накопления осадков в твердой фазе и отмирание деревьев. Часть из этих ограничений возможно обойти с помощью внесения соответствующих изменений в следующие версии модели VS-Lite.

5) Вопрос о наличии долгопериодной изменчивости в древесно-кольцевых данных имеет непосредственное отношение к вопросу прогнозирования прироста деревьев в будущем, а значит и к вопросам влияния изменений климата на экосистемы и устойчивого развития в целом.

## Заключение

В данной работе были рассмотрены многочисленные примеры получения и анализа долгопериодной климатической изменчивости на основе древесно-кольцевых данных. Был проведен сравнительный анализ методов стандартизации ДКД, направленных на сохранение долгопериодной изменчивости. Была представлена методика прямой реконструкции на основе ДКД, что позволяет обойти стандартизацию и связанную с ней потерю долгопериодной изменчивости. На основе этой методики была представлена реконструкция летних температур для северной Фенноскандии за последние два тысячелетия и выявлены ее отличия от реконструкций на основе других методик, в частности, уточняющие климатическую историю региона в период позднеантичного малого ледникового периода. Были описаны свойства набора ДКД, ответственные за содержание в них долгопериодной изменчивости. Была представлена методика, позволяющая исключать из ДКД устойчивый периодический сигнал неклиматического происхождения и показано, что это позволяет усилить климатический сигнал в ДКД и повлиять на его низкочастотную составляющую. Эта методика было использована для построения реконструкции летних температур для Огненной Земли с 1765 года, содержащей долгопериодную изменчивость, а именно значимый отрицательный тренд за весь период реконструкции. Было введено понятие «скрытой» долгопериодной изменчивости, показано наличие этой изменчивости в ДКД, ранее считавшихся неподходящими для изучения долгопериодных климатических изменений. Было показано, что скрытая долгопериодная изменчивость может быть показателем изменения экстремальности климата, и использоваться для ее прогноза. Была построена реконструкция среднегодовой температуры северо-восточной Европы за последние два тысячелетия на основе объединения ДКД с данными низкого разрешения. Были приведены примеры сравнения долгопериодной изменчивости в ДКД с другими палеоархивами, показывающие их соответствие. Наконец, была представлена методика прогноза прироста на основе выходных данных климатических моделей, учитывающая основополагающий принцип лимитирующих факторов, и показано, что она способна генерировать долгопериодную изменчивость.

Представленные в данной работе результаты свидетельствуют о том, что древесно-кольцевые данные могут успешно использоваться для реконструкции долгопериодной

климатической изменчивости как в комбинации с данными низкого разрешения, так и сами по себе. Чем дальше в прошлое начинают уходить древесно-кольцевые хронологии, построенные на основе данных с высокой климатической чувствительностью и высокой повторностью, тем больше становится свидетельств того, что эти хронологии способны воспроизводить долгопериодную изменчивость на соответствующих временных интервалах. В том же случае, когда наборы древесно-кольцевых данных не обладают каким-либо из перечисленных свойств, их стоит использовать для реконструкции высоко- и среднечастотной климатической изменчивости и объединять с палеоклиматическими данными низкого разрешения, а также проводить их исследование на предмет содержания скрытой долгопериодной изменчивости.

Многие вопросы, на которые пока не удастся ответить однозначно, без сомнения удастся ответить в ближайшем будущем, когда будут получены новые тысячелетние хронологии на основе содержания стабильных изотопов в древесине и количественных параметров анатомического строения древесины для различных районов Земли.

## 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 -  $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$  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 (обычно после стандартизации с помощью консервативных методов), но которую можно выделить из дополнительных характеристик этих рядов. На основе нескольких рядов реконструированных индексов засушливости для разных регионов показано, что такими характеристиками, обладающими долгопериодной изменчивостью, являются стандартное отклонение в скользящем окне и время возврата экстремальных событий. Описанные характеристики, следовательно, 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.
- б) Сравнение полученной реконструкции среднегодовой температуры для северо-восточной Европы, основанной на объединении древесно-кольцевых, споропыльцевых 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, судя по всему, 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.

## Словарь использованных терминов

Бутстреппинг – метод исследования статистик вероятностных распределений, основанный на многократной генерации выборок методом Монте-Карло на базе имеющейся выборки.

Декадный – в контексте данного исследования означает десятилетний, либо средний за десятилетие. Мультидекадный – многодесятилетний.

Детрендинг – удаление возрастного тренда из серий измерений годовых колец.

Долгопериодная изменчивость – свойство временного ряда, состоящее в содержании значимых линейных трендов на любом подпериоде протяженностью более 100 лет, либо статистически значимую циклическую изменчивость с периодом более 100 лет. В контексте данного исследования термины долгопериодный и низкочастотный являются синонимами.

Древесно-кольцевые данные – совокупность измерений некоего параметра годовых колец при условии, что годовые кольца перед этим были абсолютно датированы, то есть каждое измеренное значение имеет точную хронологическую привязку.

Камбиальный возраст – возраст дерева на момент формирования годового кольца. Отличается от абсолютного возраста – календарного года формирования годового кольца.

Ксилогенез – процесс образования ксилемы (древесины).

Максимальная плотность – максимальное значение плотности годового кольца. Так как плотность можно измерить только для некоторого объема, то она зависит от разрешения измеряющего прибора.

Мультиколлинеарность – наличие линейной зависимости между объясняющими переменными регрессионной модели.

Оптическая плотность (в английской литературе Optical Density или Blue Intensity) – суррогат максимальной плотности. Измеряется на основе изображений годовых колец в отраженном свете – интенсивности свечения в синем диапазоне спектра.

Принцип лимитирующих факторов – принцип, заключающийся в том, что биологические процессы, в частности рост древесных растений, не могут протекать быстрее, чем это позволяет внешним или внутренним фактором, находящимся в минимуме (Шиятов и др. 2000).

Принцип униформизма – применительно к дендрохронологии утверждает, что физические и биологические процессы, обуславливающие изменения в росте дерева под воздействием факторов окружающей среды в настоящее время, вызывали подобные же изменения в прошлом (Шиятов и др. 2000).

Прокси-данные – косвенные данные о климате прошлого, включающие древесно-кольцевые, споро-пыльцевые, ледниковые и другие типы данных. Под термином мульти-прокси подразумевается набор данных, включающих косвенные данные различного происхождения.

Сигнал и шум в древесно-кольцевых данных – в контексте данного исследования сигналом называется изменчивость в параметрах годовых колец, вызванная климатом, а шумом – изменчивость, вызванная всеми остальными факторами.

Скейлинг – процедура приведения среднего значения и стандартного отклонения одного ряда к соответствующим значениям другого за определенный период.

Стандартизация – набор методов обработки дендрохронологических данных, направленных на получения обобщенных древесно-кольцевых показателей, или хронологий, на основе серий измерений годовых колец отдельных деревьев. Включает устранение возрастных трендов, гомогенизацию изменчивости и осреднение значений для каждого календарного года.

Статистически-значимый тренд – линейная линия тренда, построенная по значениям временного ряда методом наименьших квадратов и имеющая значимый на некотором заданном доверительном уровне коэффициент при переменной времени.

Трансфер-функция – функция перехода от значения параметра прокси, например индекса древесно-кольцевой хронологии, к значению реконструируемого климатического параметра.

Форсинг – внешний фактор, влияющий на климат Земли.

N-летний сплайн – это кубический сглаживающий сплайн, убирающий 50% изменчивости ряда на периоде N лет.

## Список сокращений

АК - автокорреляция

АР1 – авторегрессионный процесс первого порядка

ГКМ – глобальная климатическая модель

ДКД – древесно-кольцевые данные

ДКХ – древесно-кольцевые хронологии

ДЯФ – декабрь, январь, февраль

ИИА – июнь, июль, август

МЛП – малый ледниковый период

НДЯФ – ноябрь, декабрь, январь, февраль

ОЗ – Огненная Земля

РГК – регрессия на главные компоненты

РЧНК – регрессия методом частных наименьших квадратов

СВ – собственный вектор

СКА – средневековая климатическая аномалия

СЛЦЧ – средиземноморские леса центрального региона Чили

ШГК – ширина годичных колец

ЭНЮК – Эль-Ниньо Южное колебание

3D – трехмерный

ABD – Age Band Decomposition, разложение по возрастным диапазонам

CE – Coefficient of Efficiency, коэффициент эффективности

CLD – Cloudiness, облачность

CM – C-Method, си-метод

CRSQ – Calibration R squared,  $R^2$  на периоде калибровки

CVRE – Cross-validation R squared,  $R^2$  на кросс-валидации (leave-one-out)

DTR – Diurnal Temperature Range, диапазон суточных температур

ECS – Environmental Curve Standardization, стандартизация кривой «окружающей среды», т.е. региональной кривой роста, изменяющейся в зависимости от изменений условий окружающей среды

EPPR – Ensemble Point-by-Point Regression, ансамблевая поточечная регрессия

EPS – Expressed Population Signal, выраженный сигнал популяции

ERDA – European Russia Drought Atlas, атлас засух Европейской России

EVC – Extreme Value Capture, учет экстремальных значений

FENN – Fennoscandia, Фенноскандия

FRS – Frost Day Frequency, частота дней с заморозками

MXD – Maximum Density, максимальная плотность

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration, национальное управление океанических и атмосферных исследований

OWDA – Old World Drought Atlas, атлас засух Старого Света

PC – Principal Component, главная компонента

PPR – Point-by-Point Regression, поточечная регрессия

PRE – Precipitation, осадки

QCIS – Queens Case Imputation and Smoothing, заполнение и сглаживание по методу ферзя

$r$  – коэффициент корреляции Пирсона

RBAR – средний коэффициент попарной корреляции древесно-кольцевых серий за общий период

RCS – Regional Curve Standardization, стандартизация региональной кривой роста

RC1 – то же, что и RCS

RC1SF – Signal-Free RCS, модификация RCS с очищением от сигнала

RC2SF – Two-Curve Signal-Free RCS, модификация RCS с очищением от сигнала и с двумя региональными кривыми роста

RC1SFC – Signal-Free RCS and Correction, RC1SF с корректировкой

RC2SFC – Two-Curve Signal-Free RCS and Correction, RC2SF с корректировкой

RCM – Regional C-Method, региональный си-метод

RE – Reduction of Error, уменьшение ошибки

RSFi – Regionally Constrained Signal-Free Method, регионально ограниченный метод очищения от сигнала

SADA – South America Drought Atlas, атлас засух Южной Америки

SF – Signal-Free Method, метод очищения от сигнала

SPEI – Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, стандартизованный индекс осадков и эвапотранспирации

SSA – Singular Spectrum Analysis, анализ сингулярного спектра



TDF, TdF – Tierra del Fuego, Огненная Земля

TMN – Minimum Temperature, минимальная температура

TMP – Mean Temperature, средняя температура

TMX – Maximum Temperature, максимальная температура

TORN – Tornetrask, Торнетреск

TRW – Tree-Ring Width, ширина годичных колец

VCE – Validation Coefficient of Efficiency, коэффициент эффективности на периоде верификации

VRE – Validation Reduction of Error, уменьшение ошибки на периоде верификации

VRSQ – Validation R squared,  $R^2$  на периоде верификации

## Список литературы

1. 8768-летняя ямальская древесно-кольцевая хронология как инструмент для палеоэкологических реконструкций / Р. М. Хантемиров, С. Г. Шиятов, Л. А. Горланова. [и др.]. // Экология. – 2021. – № 5. – С. 388-397.
2. Битвинскас, Т. Т. Дендроклиматические исследования / Т. Т. Битвинскас. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 172 с.
3. Ваганов Е. А. Рост и структура годичных колец хвойных / Е. А. Ваганов, А. В. Шашкин. – Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
4. Ваганов, Е. А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа. – Новосибирск: Наука, 1996. – 246 с.
5. Вьюхина, А. А. Интенсивность отражения синего (blue intensity): дендроклиматический потенциал сосны, произрастающей на севере Фенноскандии / А. А. Вьюхина, М. А. Гурская // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2022. – №15. – С. 244-263.
6. Дымников, В. П. Основы математической теории климата / В. П. Дымников, А.Н. Филатов. – М.: ВИНТИ, 1994. – 220 с.
7. 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.
8. 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.
9. Климанов, В. А. Колебания климата за исторический период в центре Русской равнины / В. А. Климанов, Н. А. Хотинский, Н. В. Благовещенская. // Известия РАН. Серия географическая. –1995. – № 1. – С. 89-96.
10. Клименко, В. В. Климат: непрочитанная глава истории / В. В. Клименко. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 407 с.
11. Клименко, В. В. Почему замедляется глобальное потепление? / В. В. Клименко // Доклады РАН. – 2011. – Т. 440, № 4. – С. 536-539.

12. Клименко, В. В. Колебания климата высоких широт и освоение Северо-Восточной Европы в средние века / В. В. Клименко, В. В. Мацковский, Л. И. Пахомова // История и современность. – 2012. – № 2. С. 130-163.
13. Клименко, В. В. Комплексная реконструкция климата Восточной Европы за последние 2000 лет / В. В. Клименко, А. М. Слепцов // Известия РГО. – 2003. – № 6. – С. 45-53.
14. Колчин, Б. А. Дендрохронология Новгорода / Б. А. Колчин. // МИА. – 1963. – № 117. – С. 5–103.
15. Комин, Г. Е. К методике дендроклиматологических исследований / Г. Е. Комин // Тр. ин-та экологии растений и животных УФ АН СССР. – 1970. – Вып. 67. – С. 234-241.
16. Кулакова, М. И. Дендрохронологическое изучение дерева Казанских раскопов в Пскове / М. И. Кулакова. // КСИА. – 2006. – Вып. 220. – С. 135-141.
17. Мазепа, В. С. Метод расчета индексов годичного прироста обобщенного дендроклиматологического ряда / В. С. Мазепа // Экология, 1982. – №3. – С. 21-27.
18. Мацковский, В. В. Оценка смещений в RCS-хронологиях древесных колец / В. В. Мацковский // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2011. – № 4. С. 389-404.
19. Мацковский, В. В. Климатический сигнал в ширине годичных колец хвойных деревьев на севере и в центре Европейской территории России / В. В. Мацковский. – М.: ГЕОС, 2013. – 148 с.
20. Мацковский, В. В. Дендрохронологическое исследование церкви Иоанна Богослова на Ишне / В. В. Мацковский. // История и культура Ростовской земли. – Ростов: Государственный музей-заповедник Ростовский кремль, 2013. – С. 87-92.
21. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методическое пособие / С. Г. Шиятов Е. А. Ваганов, А. В. Кирдянов. [и др.]. – Красноярск: КрасГУ, 2000. – 80 с.
22. 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.

23. Соломина, О. Н. Реконструкция гидрометеорологических условий последних столетий на Северном Кавказе, в Крыму и на Тянь-Шане по дендрохронологическим данным / О. Н. Соломина, Е. А. Долгова, О. Е. Максимова. – М.-С-Пб.: Изд-во Нестор-История, 2012. – 232 с.
24. Тарабардина, О. А. Дендрохронология средневекового Новгорода (по материалам археологических исследований 1991–2006 гг. / О. А. Тарабардина. // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2009. – № 1. – С. 77-84.
25. 1200 Years of regular outbreaks in alpine insects / J. Esper, U. Büntgen, D. C. Frank [et al.] // Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2007. – Vol. 274. – № 1610. – P. 671-679.
26. A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures / U. Büntgen, J. Esper, D. C. Frank [et al.] // Climate Dynamics. – 2005. – Vol. 25. – № 2-3.
27. A 7.5 ka chronology of stable carbon isotopes from tree rings with implications for their use in palaeo-cloud reconstruction / S. Helama, L. Arppe, M. Timonen [et al.] // Global and Planetary Change. – 2018. – Vol. 170.
28. A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: Natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales / H. Grudd, K. R. Briffa, W. Karlén [et al.] // Holocene. – 2002. – Vol. 12. – № 6.
29. A 9111 year long conifer tree-ring chronology for the European Alps: A base for environmental and climatic investigations / K. Nicolussi, M. Kaufmann, T. M. Melvin [et al.] // Holocene. – 2009. – Vol. 19. – № 6. – P. 909-920.
30. A band model of cambium development: Opportunities and prospects / V. V. Shishov, I. I. Tychkov, K. J. Anchukaitis [et al.] // Forests. – 2021. – Vol. 12. – № 10.
31. A chronology of climatic downturns through the mid- and late-Holocene: Tracing the distant effects of explosive eruptions from palaeoclimatic and historical evidence in northern Europe / S. Helama, J. Holopainen, M. Macias-Fauria [et al.] // Polar Research. – 2013. – Vol. 32. – № SUPPL.
32. A Euro-Mediterranean tree-ring reconstruction of the winter NAO index since 910 C.E. / E. R. Cook, Y. Kushnir, J. E. Smerdon [et al.] // Climate Dynamics. – 2019. – Vol. 53. – № 3-4.
33. A fistful of shells: Amplifying sclerochronological and palaeoclimate signals from molluscan death assemblages / S. Helama, J. K. Nielsen, M. M. I. Fauria, I. Valovirta // Geological Magazine. – 2009. – Vol. 146. – № 6. – P. 917-930.

34. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests / C. D. Allen, A. K. Macalady, H. Chenchouni [et al.] // *Forest ecology and management*. – 2010. – Vol. 259. – № 4. – P. 660-684.
35. A likelihood-based time series modeling approach for application in dendrochronology to examine the growth-climate relations and forest disturbance history / E. H. Lee, C. Wickham, P. A. Beedlow [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2017. – Vol. 45. – № July. – P. 132-144.
36. A millennial long March-July precipitation reconstruction for southern-central England / R. Wilson, D. Miles, N. J. Loader [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2013. – Vol. 40. – № 3-4.
37. A Model-Based Approach to Climate Reconstruction Using Tree-Ring Data / M. R. Schofield, R. J. Barker, A. Gelman [et al.] // *Journal of the American Statistical Association*. – 2016. – Vol. 111. – № 513. – P. 93-106.
38. A model-tested North Atlantic Oscillation reconstruction for the past millennium / P. Ortega, F. Lehner, D. Swingedouw [et al.] // *Nature*. – 2015. – Vol. 523. – № 7558.
39. A tree-ring reconstruction of East Anglian (UK) hydroclimate variability over the last millennium / R. J. Cooper, T. M. Melvin, I. Tyers [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2013. – Vol. 40. – № 3-4.
40. Abdi H. Partial least squares regression and projection on latent structure regression (PLS Regression) / H. Abdi // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. – 2010.
41. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks / G. H. Miller, Á. Geirsdóttir, Y. Zhong [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Vol. 39. – № 2.
42. Advances towards improved low-frequency tree-ring reconstructions, using an updated *Pinus sylvestris* L. MXD network from the Scandinavian Mountains / J. A. Björklund, B. E. Gunnarson, P. J. Krusic [et al.] // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2013. – Vol. 113. – № 3-4. – P. 697-710.
43. Age-dependent tree-ring growth responses of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) to climate-A case study in the Tianshan Mountain, China / G. Wu, G. Xu, T. Chen [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2013. – Vol. 31. – № 4. – P. 318-326.

44. Alessandro A. P. Temperature and precipitation conditions in Argentina associated with strong westerly mid-latitude / A. P. Alessandro // *Revista Brasileira de Meteorologia*. – 2008.
45. Allen C. D. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene / C. D. Allen, D. D. Breshears, N. G. McDowell // *Ecosphere*. – 2015. – Vol. 6. – № 8. – P. 1-55.
46. Altmann S. H. Insect abundance and damage on the deciduous *Nothofagus macrocarpa* increase with altitude at a site in the Mediterranean climate zone of Chile / S. H. Altmann, S. Claros // *Austral Entomology*. – 2015. – Vol. 54. – № 4. – P. 402-410.
47. Ammann C. M. The importance of the geophysical context in statistical evaluations of climate reconstruction procedures / C. M. Ammann, E. R. Wahl // *Climatic Change*. – 2007. – Vol. 85. – № 1-2. – P. 71-88.
48. An efficient forward model of the climate controls on interannual variation in tree-ring width / S. E. Tolwinski-Ward, M. N. Evans, M. K. Hughes, K. J. Anchukaitis // *Climate Dynamics*. – 2011. – Vol. 36. – № 11-12. – P. 2419-2439.
49. Ancient *Austrocedrus* tree-ring chronologies used to reconstruct central Chile precipitation variability from A.D. 1200 to 2000 / C. Le Quesne, D. W. Stahle, M. K. Cleaveland [et al.] // *Journal of Climate*. – 2006. – Vol. 19. – № 22. – P. 5731-5744.
50. Andreev A. A. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia / A. A. Andreev, V. A. Klimanov // *Journal of Paleolimnology*. – 2000. – Vol. 24. – № 1. – P. 81-91.
51. Annually resolved Atlantic sea surface temperature variability over the past 2,900 y / F. Lapointe, R. S. Bradley, P. Francus [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2020. – Vol. 117. – № 44. – P. 27171-27178.
52. Anomalías anatómicas en anillos de crecimiento anuales de *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic.-Serm. et Bizzarri en el norte de su rango de distribución / M. Rojas-Badilla, C. Álvarez, G. Velásquez-Álvarez [et al.] // *Gayana. Botánica*. – 2017. – Vol. 74. – № 2. – P. 269-281.
53. Anthropocene and streamflow: Long-term perspective of streamflow variability and water rights / P. Barria, M. Rojas, P. Moraga [et al.] // *Elem Sci Anth*. – 2019. – Vol. 7. – № 1.

54. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile / J. P. Boisier, R. Rondanelli, R. D. Garreaud, F. Muñoz // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – Vol. 43. – № 1. – P. 413-421.
55. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations / J. P. Boisier, C. Alvarez-Garreton, R. R. Cordero [et al.] // *Elementa*. – 2018. – Vol. 6.
56. Application of eco-physiological models to the climatic interpretation of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  measured in Siberian larch tree-rings / O. V. Churakova Sidorova, A. V. Shashkin, R. T. W. Siegwolf [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2016. – Vol. 39.
57. Arctic aerosols and the ‘Divergence Problem’ in dendroclimatology / U. Büntgen, A. V. Kirilyanov, P. J. Krusic [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2021. – Vol. 67.
58. Arctic amplification: Can the past constrain the future? / G. H. Miller, R. B. Alley, J. Brigham-Grette [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2010. – Vol. 29. – № 15-16.
59. Arctic Holocene proxy climate database &ndash; New approaches to assessing geochronological accuracy and encoding climate variables / H. S. Sundqvist, D. S. Kaufman, N. P. McKay [et al.] // *Climate of the Past*. – 2014. – Vol. 10. – № 4.
60. Are there enormous age-trends in stable carbon isotope ratios of oak tree rings? / D. McCarroll, J. E. Duffy, N. J. Loader [et al.] // *Holocene*. – 2020. – Vol. 30. – № 11. – P. 1637-1642.
61. Aridity changes in the Temperate-Mediterranean transition of the Andes since AD 1346 reconstructed from tree-rings / D. A. Christie, J. A. Boninsegna, M. K. Cleaveland [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2011. – Vol. 36. – № 7. – P. 1505-1521.
62. Arjava A. The mystery cloud of 536 CE in the Mediterranean sources / A. Arjava // *Dumbarton Oaks Papers*. – 2005. – Vol. 59.
63. Armesto J. The Mediterranean environment of central Chile. Vol. 7 / J. Armesto, M. T. K. Arroyo, F. Hinojosa; T. T. Veblen, K. Young, A. Orme eds. . – The physic. – Oxford University Press on Demand, 2007. – 184-199 p.
64. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium / E. R. Cook, K. J. Anchukaitis, B. M. Buckley [et al.] // *Science*. – 2010. – Vol. 328. – № 5977. – P. 486-489.
65. Assessing the dendroclimatic potential of *Nothofagus betuloides* (Magellan’s beech) forests in the southernmost Chilean Patagonia / M. Fuentes, J. C. Aravena, A. Seim, H.

- W. Linderholm // *Trees - Structure and Function*. – 2019. – Vol. 33. – № 2. – P. 557-575.
66. Augmentation de productivite du chene pubescent en region Mediterraneenne francaise / C. Rathgeber, J. Guiot, P. Roche, L. Tessier // *Annals of Forest Science*. – 1999. – Vol. 56. – № 3.
67. *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic.-Ser et Bizz.(Cupressaceae) from Chile and Argentina: monoecious or dioecious / C. Castor, J. G. Cuevas, M. T. K. Arroyo [et al.] // *Revista Chilena de Historia Natural*. – 1996. – Vol. 69. – № 1. – P. 89-95.
68. Baillie M. G. L. Proposed re-dating of the European ice core chronology by seven years prior to the 7th century AD / M. G. L. Baillie // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – Vol. 35. – № 15.
69. Baldwin H. *Nothofagus macrocarpa*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T96478456A96480000 / H. Baldwin. – 2018.
70. Baltensweiler W. Dispersal: an important driving force of the cyclic population dynamics of the larch bud moth, *Zeiraphera diniana* Gn. / W. Baltensweiler, D. Rubli // *Forest Snow and Landscape Research*. – 1999. – Vol. 74. – № 1.
71. Becker M. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France / M. Becker // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1989. – Vol. 19. – № 9.
72. Bekryaev R. V. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming / R. V. Bekryaev, I. V. Polyakov, V. A. Alexeev // *Journal of Climate*. – 2010. – Vol. 23. – № 14.
73. Berger A. *Milankovitch Theory and climate*. Vol. 26 / A. Berger. – 1988.
74. Berger A. L. Long-term variations of caloric insolation resulting from the earth's orbital elements / A. L. Berger // *Quaternary Research*. – 1978. – Vol. 9. – № 2.
75. Biodiversity hotspots for conservation priorities / N. Myers, R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier [et al.] // *Nature*. – 2000. – Vol. 403. – № 6772. – P. 853-858.
76. Biondi F. Climatic signals in tree rings of *Fagus sylvatica* L. from the central Apennines, Italy / F. Biondi // *Acta Oecologica*. – 1993. – Vol. 14. – № 1.
77. Biondi F. Biondi and Qeadan, 2008 - A theory-driven approach to tree-ring standardization Defining the biological trend expected basal area increment.pdf / F. Biondi, F. Qeadan // *Tree-Ring Research*. – 2008. – Vol. 64. – № 2. – P. 81-96.



78. Biondi F. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies / F. Biondi, K. Waikul // *Computers and Geosciences*. – 2004. – Vol. 30. – № 3. – P. 303-311.
79. Bokuchava D. D. Mechanisms of the Early 20th Century Warming in the Arctic. Vol. 222 / D. D. Bokuchava, V. A. Semenov. – 2021.
80. Bradley R. S. The explosive volcanic eruption signal in northern hemisphere continental temperature records / R. S. Bradley // *Climatic Change*. – 1988. – Vol. 12. – № 3.
81. Bradley R. S. “Little ice age” summer temperature variations: Their nature and relevance to recent global warming trends / R. S. Bradley, P. D. Jones // *Holocene*. – 1993. – Vol. 3. – № 4.
82. Breitenmoser P. Forward modelling of tree-ring width and comparison with a global network of tree-ring chronologies / P. Breitenmoser, S. Brönnimann, D. Frank // *Climate of the Past*. – 2014. – Vol. 10. – № 2. – P. 437-449.
83. Bridging past and future climate across paleoclimatic reconstructions, observations and models: A hydroclimate case study / J. E. Smerdon, B. I. Cook, E. R. Cook, R. Seager // *Journal of Climate*. – 2015. – Vol. 28. – № 8. – P. 3212-3231.
84. Briffa K. R. A Closer Look at Regional Curve Standardization of Tree-Ring Records: Justification of the Need, a Warning of Some Pitfalls, and Suggested Improvements in Its Application / K. R. Briffa, T. M. Melvin. – 2011. – Vol. 5. – P. 113-145.
85. Broecker W. S. Was the medieval warm period global? Vol. 291 / W. S. Broecker. – 2001.
86. Bunn A. G. Using a Simulation Model to Compare Methods of Tree-Ring Detrending and to Investigate the Detectability of Low-Frequency Signals / A. G. Bunn, T. J. Sharac, L. J. Graumlich // *Tree-Ring Research*. – 2004. – Vol. 60. – № 2. – P. 77-90.
87. Bunn A. An introduction to dplR / A. Bunn, M. Korpela. – 2017.
88. Büntgen U. Scrutinizing tree-ring parameters for Holocene climate reconstructions / U. Büntgen // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. – 2022. – № January. – P. 1-5.
89. Burger F. Seasonal and elevational contrasts in temperature trends in Central Chile between 1979 and 2015 / F. Burger, B. Brock, A. Montecinos // *Global and planetary change*. – 2018. – Vol. 162. – P. 136-147.

90. Canham C. D. Suppression and Release During Canopy Recruitment in *Fagus grandifolia* / C. D. Canham // *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. – 1990. – Vol. 117. – № 1.
91. Carrasco J. F. Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations / J. F. Carrasco, R. Osorio, G. Casassa // *Journal of Glaciology*. – 2008. – Vol. 54. – № 186. – P. 538-550.
92. Carrer M. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra* / M. Carrer, C. Urbinati // *Ecology*. – 2004. – Vol. 85. – № 3. – P. 730-740.
93. Chen P. Y. Geographic variation in growth response of Douglas-fir to interannual climate variability and projected climate change / P. Y. Chen, C. Welsh, A. Hamann // *Global Change Biology*. – 2010. – Vol. 16. – № 12. – P. 3374-3385.
94. Chronology and sedimentology of a new 2.9 ka annually laminated record from South Sawtooth Lake, Ellesmere Island / F. Lapointe, P. Francus, J. S. Stoner [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2019. – Vol. 222. – P. 105875.
95. Clark P. W. Identifying and Separating Pandora Moth Outbreaks and Climate from A 1500-Year Ponderosa Pine Chronology from Central Oregon / P. W. Clark, J. H. Speer, L. J. Winship // *Tree-Ring Research*. – 2017. – Vol. 73. – № 2. – P. 113-125.
96. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / R. K. Pachauri, M. R. Allen, V. R. Barros [et al.]. – 2014.
97. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains / N. M. Devi, V. V. Kukarskih, A. A. Galimova [et al.] // *Forest Ecosystems*. – 2020. – Vol. 7. – № 1.
98. Climate extremes and predicted warming threaten Mediterranean Holocene firs forests refugia / R. Sánchez-Salguero, J. J. Camarero, M. Carrer [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2017. – Vol. 114. – № 47. – P. E10142-E10150.
99. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / [IPCC Core Writing Team] Eds. R. K. Pachauri, L. A. Meyer. – Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. – 151 p.

100. Climate variability and its effects over seeds production and growth patterns of an old-growth forest in southern Chile / I. Aguilera-Betti, A. Muñoz, R. Murúa, I. Toledo-Guerrero // *Eurodendro* 2017. – Tartu, Estonia, 2017.
101. Climatic warming disrupts recurrent Alpine insect outbreaks / D. M. Johnson, U. Büntgen, D. C. Frank [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2010. – Vol. 107. – № 47.
102. Cole-Dai J. Volcanoes and climate. Vol. 1 / J. Cole-Dai. – 2010. – 824-839 p.
103. Cook E. R. A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization / E. R. Cook. – 1985.
104. Cook E. R. The Decomposition of Tree-Ring Series for Environmental Studies / E. R. Cook // *Tree-Ring Bulletin*. – 1987. – Vol. 47.
105. Cook E. R. Spatial regression methods in dendroclimatology: A review and comparison of two techniques / E. R. Cook, K. R. Briffa, P. D. Jones // *International Journal of Climatology*. – 1994. – Vol. 14. – № 4. – P. 379-402.
106. Cook E. R. A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from North America and Europe / E. R. Cook, R. D. D'Arrigo, K. R. Briffa // *Holocene*. – 1998. – Vol. 8. – № 1.
107. Cook E. R. Program ARSTAN / E. R. Cook, R. Holmes. – 1999.
108. Cook E. R. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change / E. R. Cook, K. Peters // *Holocene*. – 1997. – Vol. 7. – № 3. – P. 361-370.
109. Cook E. R. The Smoothing Spline: A New Approach to Standardizing Forest Interior Tree-Ring Width Series for Dendroclimatic Studies. Vol. 41 / E. R. Cook, K. Peters. – 1981.
110. Cool North European summers and possible links to explosive volcanic eruptions / P. D. Jones, T. M. Melvin, C. Harpham [et al.] // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2013. – Vol. 118. – № 12.
111. Copenheaver C. A. Age-specific responses to climate identified in the growth of *Quercus alba* / C. A. Copenheaver, C. J. Crawford, T. M. Fearer // *Trees - Structure and Function*. – 2011. – Vol. 25. – № 4.
112. Coupled human-climate signals on the fire history of upper Cachapoal Valley, Mediterranean Andes of Chile, since 1201 CE / V. Rozas, C. Le Quesne, M. Rojas-Badilla [et al.] // *Global and planetary change*. – 2018. – Vol. 167. – P. 137-147.

113. Cruz G. Comunidades de ciprés de la cordillera en el Alto Cachapoal / G. Cruz // Ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm. et Bizarri): antecedentes ecológicos para la conservación de las comunidades en el Alto Cachapoal / G. Cruz ed. . – Santiago : Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación ..., 2015. – P. 54-128.
114. D'Arrigo R. D. A 1000-year record of winter precipitation from northwestern New Mexico, USA: A reconstruction from tree-rings and its relation to El Niño and the Southern Oscillation / R. D. D'arrigo, G. C. Jacoby // *The Holocene*. – 1991. – Vol. 1. – № 2.
115. D'Arrigo, R. D. Review of dendroclimatic research at high latitudes in South America: Indicators of atmosphere-ocean climate variability / R. D. D'Arrigo, R. Villalba. // *Dendrochronology in Latin America* / Ed. F. A. Roig. – Mendoza, Argentina: EDIUNC, 2000 – P. 271-282.
116. D'Arrigo R. Tree-ring estimates of Pacific decadal climate variability / R. D'Arrigo, R. Villalba, G. Wiles // *Climate Dynamics*. – 2001. – Vol. 18. – № 3-4. – P. 219-224.
117. D'Arrigo R. Volcanic cooling signal in tree ring temperature records for the past millennium / R. D'Arrigo, R. Wilson, K. J. Anchukaitis // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2013. – Vol. 118. – № 16. – P. 9000-9010.
118. D'Arrigo R. On the long-term context for late twentieth century warming / R. D'Arrigo, R. Wilson, G. Jacoby // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2006. – Vol. 111. – № 3.
119. Damon P. E. Solar forcing of global temperature change since AD 1400 / P. E. Damon, A. N. Peristykh // *Climatic Change*. – 2005. – Vol. 68. – № 1-2.
120. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science / M. Reichstein, G. Camps-Valls, B. Stevens [et al.] // *Nature*. – 2019.
121.  $\delta^{13}\text{C}$  response surface resolves humidity and temperature signals in trees / T. W. D. Edwards, W. Graf, P. Trimborn [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2000. – Vol. 64. – № 2.
122. Dendrochronological studies in Tierra del Fuego, Argentina / J. A. Boninsegna, J. Keegan, G. C. Jacoby [et al.] // *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. – 1989. – P. 305-326.

123. Dendrochronologically dated changes in the limit of pine in northernmost Finland during the past 7.5 millennia / S. Helama, M. Lindholm, M. Timonen, M. Eronen // *Boreas*. – 2004. – Vol. 33. – № 3.
124. Dendroclimatic potential of dendroanatomy in temperature-sensitive *Pinus sylvestris* / J. Björklund, K. Seftigen, P. Fonti [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2020. – Vol. 60. – № June 2019. – P. 125673.
125. Dendroclimatic transfer functions revisited: Little ice age and medieval warm period summer temperatures reconstructed using artificial neural networks and linear algorithms / S. Helama, N. G. Makarenko, L. M. Karimova [et al.] // *Annales Geophysicae*. – 2009. – Vol. 27. – № 3. – P. 1097-1111.
126. Dendroclimatological reconstructions in South America: A review / J. A. Boninsegna, J. Argollo, J. C. Aravena [et al.] // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009.
127. DeSoto L. Secondary growth and carbohydrate storage patterns differ between sexes in *Juniperus thurifera* / L. DeSoto, J. M. Olano, V. Rozas // *Frontiers in Plant Science*. – 2016. – Vol. 7. – № MAY2016.
128. Detection and removal of disturbance trends in tree-ring series for dendroclimatology / M. Rydval, D. Druckenbrod, K. J. Anchukaitis, R. Wilson // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2015. – Vol. 46. – № 3. – P. 387-401.
129. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: A comparison of tree-ring standardization methods / S. Helama, M. Lindholm, M. Timonen, M. Eronen // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2004. – Vol. 79. – № 3-4. – P. 239-254.
130. Detection of human influence on a new, validated 1500-year temperature reconstruction / G. C. Hegerl, T. J. Crowley, M. Allen [et al.] // *Journal of Climate*. – 2007. – Vol. 20. – № 4. – P. 650-666.
131. Differing pre-industrial cooling trends between tree rings and lower-resolution temperature proxies / L. Klippel, S. St. George, U. Büntgen [et al.] // *Climate of the Past*. – 2020. – Vol. 16. – № 2. – P. 729-742.
132. Disentangling the Evidence of Milankovitch Forcing From Tree-Ring and Sedimentary Records / S. Helama, H. Herva, L. Arppe [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – Vol. 10. – № June. – P. 1-14.

133. Disentangling the multi-faceted growth patterns of primary *Picea abies* forests in the Carpathian arc / J. Björklund, M. Rydval, J. S. Schurman [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2019. – Vol. 271. – P. 214-224.
134. Distilling allometric and environmental information from time series of conduit size: The standardization issue and its relationship to tree hydraulic architecture. Vol. 35 / M. Carrer, G. Von Arx, D. Castagneri, G. Petit. – 2014.
135. Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest / O. C. Sidorova, L. Hellmann, L. Agafonov [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2016. – Vol. 11. – № 7.
136. Does drought incite tree decline and death in *Austrocedrus chilensis* forests? / M. M. Amoroso, L. D. Daniels, R. Villalba, P. Cherubini // *Journal of vegetation science*. – 2015. – Vol. 26. – № 6. – P. 1171-1183.
137. Donoso C. Reseña ecológica de los bosques mediterráneos de Chile / C. Donoso // *Bosque*. – 1982. – Vol. 4. – № 2. – P. 117-146.
138. Drought reconstructions for the continental United States / E. R. Cook, D. M. Meko, D. W. Stahle, M. K. Cleaveland // *Journal of Climate*. – 1999. – Vol. 12. – № 4. – P. 1145-1163.
139. Drought variability in the eastern Australia and New Zealand summer drought atlas (ANZDA, CE 1500-2012) modulated by the Interdecadal Pacific Oscillation / J. G. Palmer, E. R. Cook, C. S. M. Turney [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2015. – Vol. 10. – № 12.
140. Druckenbrod D. L. Dendroecological reconstructions of forest disturbance history using time-series analysis with intervention detection / D. L. Druckenbrod // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2005. – Vol. 35. – № 4. – P. 868-876.
141. Duchon J. Splines minimizing rotation invariant seminorms in sobolev spaces, constructive theory of functions of several variables / J. Duchon // *Lecture Notes in Mathematics*. – 1977. – Vol. 571.
142. Dupouey, J. L. A new method of standardization for examining long-term trends in tree-ring chronologies / J. L. Dupouey, J. B. Denis, M. Becke. // *Tree Rings and Environment: Proceedings of the International Symposium, Ystad, South Sweden, 3-9 September, 1990* / Eds. T. S. Bartholin, B. E. Berglund, D. Eckstein, F. H. Schweingruber, O. Eggertssons., – Lund, Sweden: Lund University, 1992. – P. 85-88.

143. Dynamic winter climate response to large tropical volcanic eruptions since 1600 / D. T. Shindell, G. A. Schmidt, M. E. Mann, G. Faluvegi // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2004. – Vol. 109. – № 5.
144. Early land use and centennial scale changes in lake-water organic carbon prior to contemporary monitoring / C. Meyer-Jacob, J. Tolu, C. Bigler [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2015. – Vol. 112. – № 21.
145. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution / A. V. Kirilyanov, P. J. Krusic, V. V. Shishov [et al.] // *Ecology Letters*. – 2020. – Vol. 23. – № 12. – P. 1827-1837.
146. Efecto de la variabilidad climática sobre los patrones de crecimiento y establecimiento de *Nothofagus macrocarpa* en Chile central / A. Venegas-González, F. Roig, A. G. Gutiérrez [et al.] // *Bosque (Valdivia)*. – 2018. – Vol. 39. – № 1. – P. 81-93.
147. Effect of scaling and regression on reconstructed temperature amplitude for the past millennium / J. Esper, D. C. Frank, R. J. S. Wilson, K. R. Briffa // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – Vol. 32. – № 7. – P. 1-5.
148. Emissions pathways, climate change, and impacts on California / K. Hayhoe, D. Cayan, C. B. Field [et al.] // *Proceedings of the national academy of sciences*. – 2004. – Vol. 101. – № 34. – P. 12422-12427.
149. Erlandsson, S. *Dendro-Chronological studies* / S. Erlandsson. – Stockholm, Sweden: Högskolas Geokronologiska Institution, 1936. – 119 p.
150. Esper J. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability / J. Esper, E. R. Cook, F. H. Schweingruber // *Science*. – 2002. – Vol. 295. – № 5563. – P. 2250-2253.
151. Esper J. Divergence pitfalls in tree-ring research / J. Esper, D. Frank // *Climatic Change*. – 2009. – Vol. 94. – № 3-4. – P. 261-266.
152. 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*. – 2020. – Vol. 611. – № 1.
153. Evidence of solar variation in tree-ring-based climate reconstructions / M. G. Ogurtsov, G. E. Kocharov, M. Lindholm [et al.] // *Solar Physics*. – 2002. – Vol. 205. – № 2.

154. Exploration of long-term growth changes using the tree-ring detrending program “Spotty” / J. Esper, P. J. Krusic, K. Peters, D. Frank // *Dendrochronologia*. – 2009. – Vol. 27. – № 1. – P. 75-82.
155. Extracting a common high frequency signal from Northern Quebec black spruce tree-rings with a Bayesian hierarchical model / J. J. Boreux, P. Naveau, O. Guin [et al.] // *Climate of the Past*. – 2009. – Vol. 5. – № 4. – P. 607-613.
156. Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia / S. Helama, M. Timonen, M. Lindholm [et al.] // *International Journal of Climatology*. – 2005. – Vol. 25. – № 13.
157. Fan Y. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5° resolution for 1948 to present / Y. Fan, H. van den Dool // *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. – 2004. – Vol. 109. – № 10. – P. 1-8.
158. Fang M. An Artificial Neural Networks-Based Tree Ring Width Proxy System Model for Paleoclimate Data Assimilation / M. Fang, X. Li // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2019. – Vol. 11. – № 4. – P. 892-904.
159. Fennoscandian summers from ad 500: temperature changes on short and long timescales / K. R. Briffa, P. D. Jones, T. S. Bartholin [et al.] // *Climate Dynamics*. – 1992. – Vol. 7. – № 3. – P. 111-119.
160. Fogt R. L. Decadal variability of the ENSO teleconnection to the high-latitude south pacific governed by coupling with the Southern Annular mode / R. L. Fogt, D. H. Bromwich // *Journal of Climate*. – 2006.
161. Forest Mensuration. For. Mensurat. / J. A. Kershaw, M. J. Ducey, T. W. Beers, B. Husch. – 2016.
162. Frank D. Adjustment for proxy number and coherence in a large-scale temperature reconstruction / D. Frank, J. Esper, E. R. Cook // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – Vol. 34. – № 16. – P. 1-5.
163. Fraver S. Identifying growth releases in dendrochronological studies of forest disturbance / S. Fraver, A. S. White // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2005. – Vol. 35. – № 7.
164. Frequency-dependent signals in multi-centennial oak vessel data / P. Fonti, K. Treydte, S. Osenstetter [et al.] // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009. – Vol. 275. – № 1-4.
165. Fritts H. C. Tree rings and climate / H. C. Fritts. – Elsevier, 1976. – 567 p.



166. Frost record in tree rings linked to atmospheric circulation in northern Patagonia / M. A. Hadad, J. A. Molina, F. A. R. Juñent [et al.] // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2019. – Vol. 524. – P. 201-211.
167. Fuegian floating tree-ring chronology from subfossil *Nothofagus* wood / F. Roig, C. Roig, J. Rabassa, J. Boninsegna // *Holocene*. – 1996.
168. Fusing pollen-stratigraphic and dendroclimatic proxy data to reconstruct summer temperature variability during the past 7.5 ka in subarctic Fennoscandia / S. Helama, H. Seppä, A. E. Bjune, H. J. B. Birks // *Journal of Paleolimnology*. – 2012. – Vol. 48. – № 1.
169. Fyodorov M. V. Sunspot minima dates: A secular forecast / M. V. Fyodorov, V. V. Klimenko, V. V. Dovgalyuk // *Solar Physics*. – 1996. – Vol. 165. – № 1.
170. Gajardo R. Antecedentes sobre el “roble de Santiago” o “roble blanco”(Nothofagus macrocarpa) y sus problemas de conservación / R. Gajardo // *Revista Bosque Nativo (Valdivia)*. – 2001. – Vol. 28. – P. 3-7.
171. Geladi P. Partial least-squares regression: a tutorial / P. Geladi, B. R. Kowalski // *Analytica Chimica Acta*. – 1986.
172. Geographical adaptation prevails over species-specific determinism in trees' vulnerability to climate change at Mediterranean rear-edge forests / I. Dorado-Liñán, G. Piovesan, E. Martínez-Sancho [et al.] // *Global change biology*. – 2019. – Vol. 25. – № 4. – P. 1296-1314.
173. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century / N. A. Rayner, D. E. Parker, E. B. Horton [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2003.
174. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly / M. E. Mann, Z. Zhang, S. Rutherford [et al.] // *Science*. – 2009. – Vol. 326. – № 5957.
175. Graumlich L. J. A 1000-Year Record of Temperature and Precipitation in the Sierra Nevada. Vol. 39 / L. J. Graumlich. – 1993.
176. Graumlich L. J. Subalpine tree growth, climate, and increasing CO<sub>2</sub>: an assessment of recent growth trends / L. J. Graumlich // *Ecology*. – 1991. – Vol. 72. – № 1.
177. Graumlich L. J. Reconstruction of annual temperature (1590-1979) for Longmire, Washington, derived from tree rings / L. J. Graumlich, L. B. Brubaker // *Quaternary Research*. – 1986. – Vol. 25. – № 2. – P. 223-234.

178. Grissino-Mayer H. D. Evaluation cross-dating accuracy / H. D. Grissino-Mayer // *Tree-ring research*. – 2001. – Vol. 57. – № 2. – P. 205-221.
179. Growth patterns of *Nothofagus pumilio* trees along altitudinal gradients in Tierra del Fuego, Argentina / G. Massaccesi, F. A. Roig, G. J. Martínez Pastur, M. D. Barrera // *Trees - Structure and Function*. – 2008. – Vol. 22. – № 2. – P. 245-255.
180. Grudd H. Torneträsk tree-ring width and density ad 500-2004: A test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers / H. Grudd // *Climate Dynamics*. – 2008. – Vol. 31. – № 7-8. – P. 843-857.
181. Guin O. Extracting a Common Signal in Tree Ring Widths with a Semi-parametric Bayesian Hierarchical Model / O. Guin, P. Naveau, J. J. Boreux // *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*. – 2018. – Vol. 23. – № 4. – P. 550-565.
182. Guiot J. Process models and model-data fusion in dendroecology / J. Guiot, E. Boucher, G. Gea-Izquierdo // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2014. – Vol. 2. – № AUG. – P. 1-12.
183. Hantemirov R. M. A continuous-multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia / R. M. Hantemirov, S. G. Shiyatov // *Holocene*. – 2002. – Vol. 12. – № 6.
184. 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.
185. Helama S. Regional curve standardization: State of the art / S. Helama, T. M. Melvin, K. R. Briffa // *Holocene*. – 2017. – Vol. 27. – № 1. – P. 172-177.
186. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: Interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures / P. D. Jones, K. R. Briffa, T. P. Barnett, S. F. B. Tett // *Holocene*. – 1998. – Vol. 8. – № 4.
187. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects / P. D. Jones, K. R. Briffa, T. J. Osborn [et al.] // *Holocene*. – 2009. – Vol. 19. – № 1. – P. 3-49.
188. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data / A. Moberg, D. M. Sonechkin, K. Holmgren [et al.] // *Nature*. – 2005. – Vol. 433. – № 7026. – P. 613-617.

189. HILLIS W. E. Occurrence of Extractives in Wood Tissues / W. E. HILLIS // Biosynthesis and Biodegradation of Wood Components. – 1985.
190. Holmes R. L. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN / R. L. Holmes, R. K. Adams, H. C. Fritts. – 1986.
191. Holocene climate variability / P. A. Mayewski, E. E. Rohling, J. C. Stager [et al.] // Quaternary Research. – 2004. – Vol. 62. – № 3.
192. Human–environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires / D. M. J. S. Bowman, A. Moreira-Muñoz, C. A. Kolden [et al.] // *Ambio*. – 2019. – Vol. 48. – № 4. – P. 350-362.
193. Huntington, E. The Climatic Factor as Illustrated in Arid America / E. Huntington. – Carnegie Institute of Washington, 1914.
194. Hydro-clima changes during the last centuries inferred from streamflow reconstructions in Chile / A. A. Muñoz, A. González-Reyes, I. Aguilera-Betti [et al.] // *Eurodendro 2017*. – Tartu, Estonia, 2017.
195. Impact of climate change on tree-ring growth of scots pine, common beech and pedunculate Oak in northeastern Germany / A. Bauwe, G. Jurasinski, T. Scharnweber [et al.] // *IForest*. – 2016. – Vol. 9. – № Feb 2016. – P. 1-11.
196. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature / M. Vuille, E. Franquist, R. Garreaud [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2015. – Vol. 120. – № 9. – P. 3745-3757.
197. Impacts of climate change on the distribution of species and communities in the Chilean Mediterranean ecosystem / N. Bambach, F. J. Meza, H. Gilabert, M. Miranda // *Regional Environmental Change*. – 2013. – Vol. 13. – № 6. – P. 1245-1257.
198. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise / T. F. Keenan, D. Y. Hollinger, G. Bohrer [et al.] // *Nature*. – 2013. – Vol. 499. – № 7458.
199. Influence of sampling and disturbance history on climatic sensitivity of temperature-limited conifers / M. Rydval, D. L. Druckenbrod, M. Svoboda [et al.] // *Holocene*. – 2018. – Vol. 28. – № 10. – P. 1574-1587.

200. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years CAL BP / P. J. Reimer, M. G. L. Baillie, E. Bard [et al.] // Radiocarbon. – 2009. – Vol. 51. – № 4. – P. 1111-1150.
201. Investigation of age trends in tree-ring stable carbon and oxygen isotopes from northern Fennoscandia over the past millennium / M. Torbenson, L. Klippel, C. Hartl [et al.] // Quaternary International. – 2022. – № May.
202. IPCC reasons for concern regarding climate change risks / B. C. O'Neill, M. Oppenheimer, R. Warren [et al.] // Nature Climate Change. – 2017. – Vol. 7. – № 1. – P. 28.
203. Jacoby G. C. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska / G. C. Jacoby, R. D. D'Arrigo // Global Biogeochemical Cycles. – 1995. – Vol. 9. – № 2.
204. Jacques-Coper M. Summer temperature in the eastern part of southern South America: its variability in the twentieth century and a teleconnection with Oceania / M. Jacques-Coper, S. Brönnimann // Climate Dynamics. – 2014.
205. Jacques-Coper M. Characterization of the 1970s climate shift in South America / M. Jacques-Coper, R. D. Garreaud // International Journal of Climatology. – 2015.
206. Jones J. M. Instrument- and tree-ring-based estimates of the Antarctic oscillation / J. M. Jones, M. Widmann // Journal of Climate. – 2003. – Vol. 16. – № 21.
207. Jones P. D. The evolution of climate over the last millennium / P. D. Jones, T. J. Osborn, K. R. Briffa // Science. – 2001. – Vol. 292. – № 5517. – P. 662-667.
208. Jump A. S. The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species / A. S. Jump, C. Mátyás, J. Peñuelas // Trends in ecology & evolution. – 2009. – Vol. 24. – № 12. – P. 694-701.
209. Kalela-Brundin M. Climatic information from tree-rings of *Pinus sylvestris* L. and a reconstruction of summer temperatures back to AD 1500 in Femundsmarka, eastern Norway, using partial least squares regression (PLS) analysis / M. Kalela-Brundin // Holocene. – 1999. – Vol. 9. – № 1. – P. 59-77.
210. Keeling, C. D. The Suess effect: <sup>13</sup>carbon-<sup>14</sup>carbon interrelations / C. D. Keeling // Environment International. – 1979. – No. 2. – P. 229–300.
211. Klimenko V. V. A composite reconstruction of the Russian Arctic climate back to A.D. 1435 / V. V. Klimenko // The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview. – 2010.

212. Klimentko V. Multi-archive temperature reconstruction of the Russian Arctic for the past two millennia / V. Klimentko, V. Matskovsky, D. Dalmann. // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2014. – № 1. – P. 16-29.
213. Koenig W. D. Scale of mast-seeding and tree-ring growth [5] / W. D. Koenig, J. M. H. Knops // *Nature*. – 1998. – Vol. 396. – № 6708. – P. 225-226.
214. Körner C. A world-wide study of high altitude treeline temperatures / C. Körner, J. Paulsen // *Journal of biogeography*. – 2004. – Vol. 31. – № 5. – P. 713-732.
215. Kullman L. Orbital Forcing and Tree-Limit History: Hypothesis and Preliminary Interpretation of Evidence from Swedish Lapland / L. Kullman // *The Holocene*. – 1992. – Vol. 2. – № 2.
216. Kuznetsova V. V. Contrasting climate signals across a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) tree-ring network in the Middle Volga (European Russia) / V. V. Kuznetsova, O. N. Solomina // *Dendrochronologia*. – 2022. – Vol. 73. – № March. – P. 125957.
217. Lamarche V. C. Sampling strategies. / V. C. Lamarche, E. R. Cook, M. G. L. Baillie // *Climate from tree rings*. – 1982.
218. Lapointe F. Little Ice Age abruptly triggered by intrusion of Atlantic waters into the Nordic Seas / F. Lapointe, R. S. Bradley // *Science Advances*. – 2021. – Vol. 7. – № 51.
219. Large-scale control on the Patagonian climate / R. Garreaud, P. Lopez, M. Minvielle, M. Rojas // *Journal of Climate*. – 2013. – Vol. 26. – № 1. – P. 215-230.
220. Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years / R. Villalba, A. Lara, J. A. Boninsegna [et al.] // *Climatic Change*. – 2003.
221. Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context / R. Wilson, K. Anchukaitis, K. R. Briffa [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2016. – Vol. 134. – P. 1-18.
222. Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions / K. J. Anchukaitis, R. Wilson, K. R. Briffa [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2017. – Vol. 163. – P. 1-22.
223. Late Holocene climatic variability reconstructed from incremental data from pines and pearl mussels - a multi-proxy comparison of air and subsurface temperatures / S. Helama, A. Läänelaid, H. Tietäväinen [et al.] // *Boreas*. – 2010. – Vol. 39. – № 4. – P. 734-748.

224. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit / F. Hagedorn, M. A. Dawes, M. O. Bubnov [et al.] // *Journal of Biogeography*. – 2020. – Vol. 47. – № 8.
225. Lee T. C. K. Evaluation of proxy-based millennial reconstruction methods / T. C. K. Lee, F. W. Zwiers, M. Tsao // *Climate Dynamics*. – 2008.
226. Levesque M. Water availability drives gas exchange and growth of trees in northeastern US, not elevated CO<sub>2</sub> and reduced acid deposition / M. Levesque, L. Andreu-Hayles, N. Pederson // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – № March. – P. 1-9.
227. Linderholm H. W. Comparing Scots pine tree-ring proxies and detrending methods among sites in Jämtland, west-central Scandinavia / H. W. Linderholm, B. E. Gunnarson, Y. Liu // *Dendrochronologia*. – 2010. – Vol. 28. – № 4. – P. 239-249.
228. Linderholm H. W. Age-dependent climate sensitivity of *Pinus sylvestris* L. in the central Scandinavian Mountains / H. W. Linderholm, K. Linderholm // *Boreal Environment Research*. – 2004. – Vol. 9. – № 4.
229. Linking macroecology and community ecology: refining predictions of species distributions using biotic interaction networks / P. P. A. Staniczenko, P. Sivasubramaniam, K. B. Suttle, R. G. Pearson // *Ecology letters*. – 2017. – Vol. 20. – № 6. – P. 693-707.
230. Ljungqvist F. C. A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical northern hemisphere during the last two millennia / F. C. Ljungqvist // *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*. – 2010. – Vol. 92. – № 3. – P. 339-351.
231. Llacabure, J. J. Relaciones entre el crecimiento de *Nothofagus betuloides* y el clima local y de gran escala en bosques subantárticos de la Isla Navarino: Tesis Ingeniero Forestal / Juan Carlos Llacabure Jara. – Valdivia, Chile, 2011. – 29 p.
232. Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation / C. Le Quesne, C. Acuña, J. A. Boninsegna [et al.] // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009. – Vol. 281. – № 3. – P. 334-344.
233. Long-Term Growth Trends of Trees: Ten Years of Dendrochronological Studies in France / V. Badeau, M. Becker, D. Bert [et al.] // *Growth Trends in European Forests*. – 1996.
234. Long tree-ring records from the Southern Hemisphere / F. A. Roig, J. G. Palmer, E. R. Cook. [et al.] // *La Dendroecologie: Principes, Methodes et Applications* / Eds. S.

- Payette, L. Filion. – Québec: Les Presses de l'Université Laval, Québec, 2010. – P. 647-682.
235. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network / K. R. Briffa, T. J. Osborn, F. H. Schweingruber [et al.] // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2001. – Vol. 106. – № D3. – P. 2929-2941.
236. Luckman B. H. Summer temperatures in the Canadian Rockies during the last millennium: A revised record / B. H. Luckman, R. J. S. Wilson // *Climate Dynamics*. – 2005. – Vol. 24. – № 2-3.
237. Luebert F. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile / F. Luebert, P. Pliscoff; E. Universitaria ed. . – Santiago, 2006. – 318 p.
238. Lynch A. M. What Tree-Ring Reconstruction Tells Us about Conifer Defoliator Outbreaks / A. M. Lynch // *Insect Outbreaks Revisited*. – 2012.
239. Mann M. E. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations / M. E. Mann, R. S. Bradley, M. K. Hughes // *Geophysical Research Letters*. – 1999. – Vol. 26. – № 6. – P. 759-762.
240. Mann M. E. Underestimation of volcanic cooling in tree-ring-based reconstructions of hemispheric temperatures / M. E. Mann, J. D. Fuentes, S. Rutherford // *Nature Geoscience*. – 2012. – Vol. 5. – № 3. – P. 202-205.
241. Marshall G. J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses / G. J. Marshall // *Journal of Climate*. – 2003.
242. Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden / I. Drobyshev, R. Övergaard, I. Saygin [et al.] // *Forest Ecology and Management*. – 2010. – Vol. 259. – № 11. – P. 2160-2171.
243. Mathiasen P. Living on the edge: adaptive and plastic responses of the tree *Nothofagus pumilio* to a long-term transplant experiment predict rear-edge upward expansion / P. Mathiasen, A. C. Premoli // *Oecologia*. – 2016. – Vol. 181. – № 2. – P. 607-619.
244. 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.
245. 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.

246. 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.
247. 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.
248. 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.
249. Matthews J. A. The “Little Ice Age”: Re-evaluation of an evolving concept. Vol. 87 / J. A. Matthews, K. R. Briffa. – 2005.
250. McCarroll D. Measuring the skill of variance-scaled climate reconstructions and a test for the capture of extremes / D. McCarroll, G. H. F. Young, N. J. Loader // *Holocene*. – 2015. – Vol. 25. – № 4.
251. Meko D. Dendroclimatic reconstruction with time varying predictor subsets of tree indices / D. Meko // *Journal of Climate*. – 1997.
252. Melvin T. M. Historical Growth Rates and Changing Climatic Sensitivity of Boreal Conifers / T. M. Melvin. – 2004. – № May. – P. 1-248.
253. Melvin T. M. A “signal-free” approach to dendroclimatic standardisation / T. M. Melvin, K. R. Briffa // *Dendrochronologia*. – 2008. – Vol. 26. – № 2. – P. 71-86.
254. Melvin T. M. Potential bias in “updating” tree-ring chronologies using regional curve standardisation: Re-processing 1500 years of Torneträsk density and ring-width data / T. M. Melvin, H. Grudd, K. R. Briffa // *Holocene*. – 2013. – Vol. 23. – № 3. – P. 364-373.
255. *Methods of Dendrochronology* / E. R. Cook, L. A. Kairiukstis eds. . – Dordrecht : Springer Netherlands, 1990. – URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-015-7879-0> (date accessed: 12.04.2022). – Text : electronic.
256. Mid- to Late Holocene climate change: an overview / H. Wanner, J. Beer, J. Bütikofer [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2008. – Vol. 27. – № 19-20. – P. 1791-1828.



257. Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain) / J. Penuelas, R. Ogaya, M. Boada, A. S Jump // *Ecography*. – 2007. – Vol. 30. – № 6. – P. 829-837.
258. Misson L. MAIDEN: a model for analyzing ecosystem processes in dendroecology / L. Misson. – Text : electronic // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2004. – Vol. 34. – № 4. – P. 874-887. – URL: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/x03-252> (date accessed: 12.04.2022).
259. Mitchell, V. L. An investigation of certain aspects of tree growth rates in relation to climate in the central Canadian boreal forest / V. L. Mitchell. – Department of Meteorology, The University of Wisconsin-Madison, Technical Report, 33, 1967. – P. 1-62.
260. Moiseev P. A. Climate changes and tree stand dynamics at the upper limit of their growth in the North Ural mountains / P. A. Moiseev, A. A. Bartysh, Z. Y. Nagimov // *Russian Journal of Ecology*. – 2010. – Vol. 41. – № 6. – P. 486-497.
261. Monitoring global drought using the self-calibrating Palmer Drought Severity Index [in “State of the Climate in 2015”] / T. Osborn, J. Barichivich, I. Harris [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2016. – Vol. 97.
262. Montecinos A. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies / A. Montecinos, P. Aceituno // *Journal of Climate*. – 2003. – Vol. 16. – № 2. – P. 281-296.
263. Multicentennial ring-width chronologies of Scots pine along a north-south gradient across Finland / S. Helama, M. Lindholm, J. Meriläinen [et al.] // *Tree-Ring Research*. – 2005. – Vol. 61. – № 1. – P. 21-32.
264. Multiproxy record of Holocene paleoenvironmental change, Tierra del Fuego, Argentina / A. M. Borromei, A. Coronato, L. G. Franzén [et al.] // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2010. – Vol. 286. – № 1-2. – P. 1-16.
265. Multiproxy summer and winter surface air temperature field reconstructions for southern South America covering the past centuries / R. Neukom, J. Luterbacher, R. Villalba [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2011. – Vol. 37. – P. 35-51.
266. National Research Council. Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years. – The National Academies Press, Committee on Surface Temperature reconstructions for the Last 2,000 Years, Washington, D.C., 2006. – 196 p.

267. Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence / A. Miranda, A. Altamirano, L. Cayuela [et al.] // *Regional Environmental Change*. – 2016. – P. 1-13.
268. Naurzbaev M. M. Tree-ring growth curves as sources of climatic information / M. M. Naurzbaev, M. K. Hughes, E. A. Vaganov // *Quaternary Research*. – 2004. – Vol. 62. – № 2. – P. 126-133.
269. New ice core evidence for a volcanic cause of the A.D. 536 dust veil / L. B. Larsen, B. M. Vinther, K. R. Briffa [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – Vol. 35. – № 4.
270. New tree-ring evidence from the pyrenees reveals western mediterranean climate variability since medieval times / U. Büntgen, P. J. Krusic, A. Verstege [et al.] // *Journal of Climate*. – 2017. – Vol. 30. – № 14. – P. 5295-5318.
271. Nicolussi K. Increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from the central Alps that may be CO<sub>2</sub>-related / K. Nicolussi, S. Bortenschlager, C. Körner // *Trees*. – 1995. – Vol. 9. – № 4.
272. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era / R. Neukom, N. Steiger, J. J. Gómez-Navarro [et al.] // *Nature*. – 2019. – Vol. 571. – № 7766. – P. 550-554.
273. Northern European summer temperature variations over the Common Era from integrated tree-ring density records / J. Esper, E. Dũthorn, P. J. Krusic [et al.] // *Journal of Quaternary Science*. – 2014. – Vol. 29. – № 5. – P. 487-494.
274. Northern Hemisphere temperature patterns in the last 12 centuries / F. C. Ljungqvist, P. J. Krusic, G. Brattström, H. S. Sundqvist // *Climate of the Past*. – 2012. – Vol. 8. – № 1. – P. 227-249.
275. Observed forest sensitivity to climate implies large changes in 21st century North American forest growth / N. D. Charney, F. Babst, B. Poulter [et al.] // *Ecology Letters*. – 2016. – Vol. 19. – № 9. – P. 1119-1128.
276. Old World megadroughts and pluvials during the Common Era / E. R. Cook, R. Seager, Y. Kushnir [et al.] // *Science Advances*. – 2015. – Vol. 1. – № 10.
277. Oliveira J. M. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlands / J. M. Oliveira, F. A. Roig, V. D. Pillar // *Austral Ecology*. – 2010. – Vol. 35. – № 2. – P. 134-147.

278. On the “Divergence Problem” in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes / R. D’Arrigo, R. Wilson, B. Liepert, P. Cherubini // *Global and Planetary Change*. – 2008. – Vol. 60. – № 3-4. – P. 289-305.
279. Orbital forcing of tree-ring data / J. Esper, D. C. Frank, M. Timonen [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2012. – Vol. 2. – № 12. – P. 862-866.
280. Orbital forcing of tree-ring data / J. Esper, D. C. Frank, M. Timonen [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2012. – Vol. 2. – № 12. – P. 862-866.
281. Orbital Forcing Strongly Influences Seasonal Temperature Trends During the Last Millennium / L. J. Lücke, A. P. Schurer, R. Wilson, G. C. Hegerl // *Geophysical Research Letters*. – 2021. – Vol. 48. – № 4.
282. Osborn T. Adjusting variance for sample-size in tree-ring chronologies and other regional-mean timeseries / T. Osborn, K. Biffa, P. Jones // *Dendrochronologia*. – 1997. – Vol. 15. – P. 89-99.
283. Osborn T. J. The spatial extent of 20th-century warmth in the context of the past 1200 years / T. J. Osborn, K. R. Briffa // *Science*. – 2006. – Vol. 311. – № 5762. – P. 841-844.
284. PAGES Consortium. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era / PAGES Consortium // *Scientific data*. – 2017. – Vol. 4.
285. Palacios, M., 2013. Reconstrucción dendrocronológica de ataques de cuncuna (*Ormiscodes amphimone*) en bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) en el Chaltén: tesina de grado / Misael Palacios. – Santa Cruz, Argentina, 2013.
286. Paritsis J. Dendroecological analysis of defoliator outbreaks on *Nothofagus pumilio* and their relation to climate variability in the Patagonian Andes / J. Paritsis, T. T. Veblen // *Global Change Biology*. – 2011. – Vol. 17. – № 1. – P. 239-253.
287. Paritsis J. Assessing dendroecological methods to reconstruct defoliator outbreaks on *Nothofagus pumilio* in northwestern Patagonia, Argentina / J. Paritsis, T. T. Veblen, T. Kitzberger // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2009. – Vol. 39. – № 9.
288. Paruelo J. M. Biozones of Patagonia (Argentina) / J. M. Paruelo, E. G. Jobbagy, O. E. Sala // *Ecologia Austral*. – 1998.
289. Payette S. The circumboreal tundra-taiga interface: Late Pleistocene and Holocene changes / S. Payette, M. Eronen, J. J. P. Jasinski // *Ambio*. – 2002. – Vol. 31.
290. Persistent solar influence on north atlantic climate during the Holocene / G. Bond, B. Kromer, J. Beer [et al.] // *Science*. – 2001. – Vol. 294. – № 5549.

291. Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models / W. R. L. Anderegg, C. Schwalm, F. Biondi [et al.] // *Science*. – 2015. – Vol. 349. – № 6247. – P. 528-532.
292. Peterson T. C. An Overview of the Global Historical Climatology Network Temperature Database / T. C. Peterson, R. S. Vose // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1997. – Vol. 78. – № 12.
293. Piper F. I. Extreme defoliation reduces tree growth but not C and N storage in a winter-deciduous species / F. I. Piper, M. J. Gundale, A. Fajardo // *Annals of Botany*. – 2015. – Vol. 115. – № 7.
294. Pompa-García M. Observed and projected impacts of climate on radial growth of three endangered conifers in northern Mexico indicate high vulnerability of drought-sensitive species from mesic habitats / M. Pompa-García, R. Sánchez-Salguero, J. J. Camarero // *Dendrochronologia*. – 2017. – Vol. 45.
295. Present-day South American climate / R. D. Garreaud, M. Vuille, R. Compagnucci, J. Marengo // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009. – Vol. 281. – № 3-4. – P. 180-195.
296. Probabilistic reconstructions of local temperature and soil moisture from tree-ring data with potentially time-varying climatic response / S. E. Tolwinski-Ward, M. P. Tingley, M. N. Evans [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2015. – Vol. 44. – № 3-4. – P. 791-806.
297. Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios / D. Bozkurt, M. Rojas, J. P. Boisier, J. Valdivieso // *Climatic change*. – 2018. – Vol. 150. – № 3-4. – P. 131-147.
298. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia / M. E. Mann, Z. Zhang, M. K. Hughes [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2008. – Vol. 105. – № 36. – P. 13252-13257.
299. Quantifying massive outbreaks of the defoliator moth *Ormiscodes amphimone* in deciduous *Nothofagus*-dominated southern forests using remote sensing time series analysis / S. A. Estay, R. O. Chávez, R. Rocco, A. G. Gutiérrez // *Journal of Applied Entomology*. – 2019. – Vol. 143. – № 7. – P. 787-796.
300. Radial Growth Patterns Associated with Tree Mortality in *Nothofagus pumilio* Forest / M. Rodríguez-Catón, R. Villalba, A. Srur, A. P. Williams // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 6. – P. 489.

301. 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. – 2020. – Vol. 438. – № 1.
302. Radiodensitometric-dendroclimatological conifer chronologies from Lapland (Scandinavia) and the Alps (Switzerland) / F. H. Schweingruber, T. Bartholin, E. Schaur, K. R. Briffa // *Boreas*. – 1988. – Vol. 17. – № 4.
303. Ragettli S. Contrasting climate change impact on river flows from high-altitude catchments in the Himalayan and Andes Mountains / S. Ragettli, W. W. Immerzeel, F. Pellicciotti // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2016. – Vol. 113. – № 33. – P. 9222-9227.
304. Rahman M. Tree radial growth is projected to decline in South Asian moist forest trees under climate change / M. Rahman, M. Islam, A. Bräuning // *Global and Planetary Change*. – 2018. – Vol. 170. – P. 106-119.
305. Rasband W. S. Image J, US National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 2014 / W. S. Rasband. – 1997.
306. Recent Consequences of Climate Change Have Affected Tree Growth in Distinct *Nothofagus Macrocarpa* (DC.) FM Vaz & Rodr Age Classes in Central Chile / A. Venegas-González, F. A. Roig, K. Peña-Rojas [et al.] // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 8. – P. 653.
307. Recent decadal drought reverts warming-triggered growth enhancement in contrasting climates in the southern Andes tree line / A. Fajardo, A. Gazol, C. Mayr, J. J. Camarero // *Journal of Biogeography*. – 2019.
308. Recent European drought extremes beyond Common Era background variability / U. Büntgen, O. Urban, P. J. Krusic [et al.] // *Nature Geoscience*. – 2021. – Vol. 14. – № 4. – P. 190-196.
309. Recent radial growth decline in response to increased drought conditions in the northernmost *Nothofagus* populations from South America / A. Venegas-González, F. A. Roig, A. G. Gutiérrez, M. Tomazello Filho // *Forest Ecology and Management*. – 2018. – Vol. 409. – P. 94-104.
310. Recent trends in tree-ring records from high elevation sites in the Andes of northern Patagonia / R. Villalba, J. A. Boninsegna, T. T. Veblen [et al.] // *Climatic Change*. – 1997. – Vol. 36. – № 3-4. – P. 425-454.

311. Recent warming reverses long-term arctic cooling / D. S. Kaufman, D. P. Schneider, N. P. McKay [et al.] // *Science*. – 2009. – Vol. 325. – № 5945. – P. 1236-1239.
312. Recognising bias in Common Era temperature reconstructions / U. Büntgen, D. Arseneault, O. V Churakova [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2022. – Vol. 74. – P. 125982.
313. Reconstructing past climate from noisy data / H. von Storch, E. Zorita, J. M. Jones [et al.] // *Science*. – 2004. – Vol. 306. – № 5696. – P. 679-682.
314. Recurrent transitions to Little Ice Age-like climatic regimes over the Holocene / S. Helama, M. Stoffel, R. J. Hall [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2021.
315. Regeneration patterns and persistence of the fog-dependent Fray Jorge forest in semiarid Chile during the past two centuries / A. G. Gutierrez, O. Barbosa, D. A. Christie [et al.] // *Global Change Biology*. – 2008. – Vol. 14. – № 1. – P. 161-176.
316. Risky future for Mediterranean forests unless they undergo extreme carbon fertilization / G. Gea-Izquierdo, A. Nicault, G. Battipaglia [et al.] // *Global Change Biology*. – 2017. – Vol. 23. – № 7.
317. Roig F. A. Stable oxygen isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in *Austrocedrus chilensis* tree rings reflect climate variability in northwestern Patagonia, Argentina / F. A. Roig, R. Siegwolf, J. A. Boninsegna // *International journal of biometeorology*. – 2006. – Vol. 51. – № 2. – P. 97-105.
318. Salminen H. The effect of temperature on height growth of Scots pine in northern Finland / H. Salminen // *Dissertationes Forestales*. – 2009. – Vol. 2009. – № 96.
319. Scafetta N. Advanced Testing of Low, Medium, and High ECS CMIP6 GCM Simulations Versus ERA5-T2m / N. Scafetta // *Geophysical Research Letters*. – 2022. – Vol. 49. – № 6.
320. Scafetta N. Testing the CMIP6 GCM simulations versus surface temperature records from 1980–1990 to 2011–2021: High ECS is not supported / N. Scafetta // *Climate*. – 2021. – Vol. 9. – № 11.
321. Schlegel F. Hallazgo de un bosque de cipreses cordilleranos en la provincia de Aconcagua / F. Schlegel // *Boletín Universidad de Chile*. – 1962. – Vol. 32. – P. 43-46.
322. Schleussner C. F. A volcanically triggered regime shift in the subpolar North Atlantic Ocean as a possible origin of the Little Ice Age / C. F. Schleussner, G. Feulner // *Climate of the Past*. – 2013. – Vol. 9. – № 3.

323. Schulman, E. Dendroclimatic change in semiarid America / E. Schulman. – Tucson, Arizona, 1956.
324. Scientific Merits and Analytical Challenges of Tree-Ring Densitometry / J. Björklund, G. von Arx, D. Nievergelt [et al.] // *Reviews of Geophysics*. – 2019. – Vol. 57. – № 4. – P. 1224-1264.
325. Sea-level pressure variability around Antarctica since A.D. 1750 inferred from subantarctic tree-ring records / R. Villalba, E. R. Cook, R. D. D'Arrigo [et al.] // *Climate Dynamics*. – 1997. – Vol. 13. – № 6. – P. 375-390.
326. Siberian tree-ring and stable isotope proxies as indicators of temperature and moisture changes after major stratospheric volcanic eruptions / O. V. Churakova, M. V. Fonti, M. Saurer [et al.] // *Climate of the Past*. – 2019. – Vol. 15. – № 2.
327. Signals and memory in tree-ring width and density data / J. Esper, L. Schneider, J. E. Smerdon [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2015. – Vol. 35.
328. 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.
329. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBío region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI) / F. Zambrano, M. Lillo-Saavedra, K. Verbist, O. Lagos // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8. – № 6. – P. 530.
330. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region / M. H. Masiokas, R. Villalba, B. H. Luckman [et al.] // *Journal of Climate*. – 2006. – Vol. 19. – № 24. – P. 6334-6352.
331. 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. – № October. – P. 1-8.
332. Soto-Rogel P. A dendroclimatic analysis of *Nothofagus betuloides* forests from cordillera Darwin, Tierra del Fuego, Chile / P. Soto-Rogel, J. C. Aravena // *Bosque*. – 2017. – Vol. 38. – № 1. – P. 155-168.
333. Souto C. *Austrocedrus chilensis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T31359A2805519 / C. Souto, M. Gardner. – 2013.
334. Spatial and temporal variation in *Nothofagus pumilio* growth at tree line along its latitudinal range (35°40'–55° S) in the Chilean Andes / A. Lara, R. Villalba, A.

- Wolodarsky-Franke [et al.] // *Journal of Biogeography*. – 2005. – Vol. 32. – № 5. – P. 879-893.
335. Spatial patterns of precipitation-induced moisture availability and their effects on the divergence of conifer stem growth in the western and eastern parts of China's semi-arid region / X. Zeng, M. N. Evans, X. Liu [et al.] // *Forest Ecology and Management*. – 2019. – Vol. 451. – P. 117524.
336. Spatio-temporal patterns of the 2010–2015 extreme hydrological drought across the Central Andes, Argentina / J. Rivera, O. Penalba, R. Villalba, D. Araneo // *Water*. – 2017. – Vol. 9. – № 9. – P. 652.
337. Spatio-Temporal variability of Arctic summer temperatures over the past 2 millennia / J. P. Werner, D. V. Divine, F. C. Ljungqvist [et al.] // *Climate of the Past*. – 2018. – Vol. 14. – № 4. – P. 527-557.
338. Spatiotemporal variations in hydroclimate across the Mediterranean Andes (30–37 S) since the early twentieth century / Á. González-Reyes, J. McPhee, D. A. Christie [et al.] // *Journal of Hydrometeorology*. – 2017. – Vol. 18. – № 7. – P. 1929-1942.
339. Speer, J. H. Oak mast history from dendrochronology: a new technique demonstrated in the Southern Appalachian region: doctoral dissertation / James J. Speer. – Knoxville, 2001. – 120 p.
340. Speer J. H. Fundamentals of tree-ring research / J. H. Speer. – 2012.
341. Steinhilber F. Total solar irradiance during the Holocene / F. Steinhilber, J. Beer, C. Fröhlich // *Geophysical Research Letters*. – 2009. – Vol. 36. – № 19.
342. Stokes, M. A. An introduction to tree-ring dating / M. A. Stokes, T.L. Smiley. – Chicago: University of Chicago Press, 1968. – 73 p.
343. Stothers R. B. Mystery cloud of AD 536 / R. B. Stothers // *Nature*. – 1984. – Vol. 307. – № 5949.
344. Stothers R. B. Volcanic dry fogs, climate cooling, and plague pandemics in Europe and the Middle East / R. B. Stothers // *Climatic Change*. – 1999. – Vol. 42. – № 4.
345. Structure, dynamics and dendroecology of an old-growth *Fagus* forest in the Apennines / G. Piovesan, A. Di Filippo, A. Alessandrini [et al.] // *Journal of Vegetation Science*. – 2005. – Vol. 16. – № 1.
346. Structure and origin of Holocene cold events / H. Wanner, O. Solomina, M. Grosjean [et al.] // *Quaternary Science Reviews*. – 2011. – Vol. 30. – № 21-22. – P. 3109-3123.



347. Suess, H. E. Radiocarbon concentration in modern wood / H. E. Suess // *Science*. – 1955. No. 122. – P. 415–417.
348. Summer heat waves in southeastern Patagonia: An analysis of the intraseasonal timescale / M. Jacques-Coper, S. Brönnimann, O. Martius [et al.] // *International Journal of Climatology*. – 2016.
349. 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.
350. Summer temperature variations in Lapland during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age relative to natural instability of thermohaline circulation on multi-decadal and multi-centennial scales / S. Helama, M. Timonen, J. Holopainen [et al.] // *Journal of Quaternary Science*. – 2009. – Vol. 24. – № 5.
351. Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series / M. M. Naurzbaev, E. A. Vaganov, O. V. Sidorova, F. H. Schweingruber // *Holocene*. – 2002. – Vol. 12. – № 6.
352. Support for global climate reorganization during the “Medieval Climate Anomaly” / N. E. Graham, C. M. Ammann, D. Fleitmann [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2011. – Vol. 37. – № 5.
353. Teleconnections and relationship between the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Southern Annular Mode (SAM) in reconstructions and models over the past millennium / C. Dätwyler, M. Grosjean, N. J. Steiger, R. Neukom // *Climate of the Past*. – 2020.
354. Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends / J. Esper, S. G. Shiyatov, V. S. Mazepa [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2003. – Vol. 21. – № 7-8.
355. Temperature reconstruction in the Ob River valley based on ring widths of three coniferous tree species / M. Gurskaya, M. Hallinger, J. Singh [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2012. – Vol. 30. – № 4. – P. 302-309.
356. Temporal changes in climatic limitation of tree-growth at upper treeline forests: Contrasted responses along the west-to-east humidity gradient in Northern Patagonia / A. Lavergne, V. Daux, R. Villalba, J. Barichivich // *Dendrochronologia*. – 2015. – Vol. 36. – № November. – P. 49-59.

357. Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies / J. Esper, E. R. Cook, P. J. Krusic [et al.]. – 2003.
358. The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe; A unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions / M. Friedrich, S. Remmele, B. Kromer [et al.] // *Radiocarbon*. – 2004. – Vol. 46. – № 3.
359. The 15th century Arctic warming in coupled model simulations with data assimilation / E. Cressin, H. Goosse, T. Fichefet, M. E. Mann // *Climate of the Past*. – 2009. – Vol. 5. – № 3. – P. 389-401.
360. The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation / R. Garreaud, C. Alvarez-Garretón, J. Barichivich [et al.] // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2017. – P. in review.
361. The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile / M. E. González, S. Gómez-González, A. Lara [et al.] // *Ecosphere*. – 2018. – Vol. 9. – № 8. – P. e02300.
362. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective / R. D. Garreaud, J. P. Boisier, R. Rondanelli [et al.] // *International Journal of Climatology*. – 2019.
363. The early 20th century warming: Anomalies, causes, and consequences. Vol. 9 / G. C. Hegerl, S. Brönnimann, A. Schurer, T. Cowan. – 2018.
364. The European Russia Drought Atlas (1400–2016 CE) / E. R. Cook, O. Solomina, V. Matskovsky [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2020.
365. The impact of a changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula summer temperatures / G. J. Marshall, A. Orr, N. P. M. van Lipzig, J. C. King // *Journal of Climate*. – 2006. – Vol. 19. – № 20. – P. 5388-5404.
366. The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. Vol. 149 / D. W. Stahle, E. R. Cook, D. J. Burnette [et al.]. – 2016.
367. The role of forcing and internal dynamics in explaining the “Medieval Climate Anomaly” / H. Goosse, E. Cressin, S. Dubinkina [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2012. – Vol. 39. – № 12.
368. The “segment length curse” in long tree-ring chronology development for palaeoclimatic studies / E. R. Cook, K. R. Briffa, D. M. Meko [et al.]. – Text : electronic

- // The Holocene. – 1995. – Vol. 5. – № 2. – P. 229-237. – URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/095968369500500211> (date accessed: 12.04.2022).
369. Three centuries of insect outbreaks across the European Alps / U. Büntgen, D. Frank, A. Liebhold [et al.] // *New Phytologist*. – 2009. – Vol. 182. – № 4.
370. Time-varying-response smoothing / T. M. Melvin, K. R. Briffa, K. Nicolussi, M. Grabner // *Dendrochronologia*. – 2007. – Vol. 25. – № 1. – P. 65-69.
371. Timilsena J. Regionalization and reconstruction of snow water equivalent in the upper Colorado River basin / J. Timilsena, T. Piechota // *Journal of Hydrology*. – 2008.
372. Tolwinski-Ward S. E. Bayesian parameter estimation and interpretation for an intermediate model of tree-ring width / S. E. Tolwinski-Ward, K. J. Anchukaitis, M. N. Evans // *Climate of the Past*. – 2013. – Vol. 9. – № 4. – P. 1481-1493.
373. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system / L. C. Slivinski, G. P. Compo, J. S. Whitaker [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2019.
374. 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. – № December 2020.
375. Tree-ring-reconstructed summer temperatures from Northwestern North America during the last nine centuries / K. J. Anchukaitis, R. D. D'Arrigo, L. Andreu-Hayles [et al.] // *Journal of Climate*. – 2013. – Vol. 26. – № 10. – P. 3001-3012.
376. Tree-ring data set for dendroclimatic reconstructions and dendrochronological dating in European Russia / O. Solomina, V. Matskovsky, E. Dolgova [et al.]. – 2022.
377. Tree-ring growth patterns and temperature reconstruction from *Nothofagus pumilio* (Fagaceae) forests at the upper tree line of southern Chilean Patagonia / J. C. Aravena, A. Lara, A. Wolodarsky-Franke [et al.] // *Revista Chilena de Historia Natural*. – 2002.
378. Tree-ring reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 C.E / E. R. Cook, P. J. Krusic, K. J. Anchukaitis [et al.] // *Climate Dynamics*. – 2013. – Vol. 41. – № 11-12.
379. Tree-ring standardization and growth-trend estimation / E. R. Cook, K. Briffa, S. Shiyatov, V. Mazepa // *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. – 1990. – P. 104-123.

380. Tree-ring variables as proxy-climate indicators: Problems with low-frequency signals / K. R. Briffa, P. D. Jones, F. H. Schweingruber [et al.] // *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. – 1996.
381. Tree-rings reveal two strong solar proton events in 7176 and 5259 / N. Brehm, M. Christl, F. Adolphi [et al.] // *Nature Communications*. – 2021.
382. 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. – № November 2019.
383. Tree rings reveal globally coherent signature of cosmogenic radiocarbon events in 774 and 993 CE / U. Büntgen, L. Wacker, J. D. Galván [et al.] // *Nature Communications*. – 2018. – Vol. 9. – № 1.
384. Trenberth K. E. Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation / K. E. Trenberth // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 1976. – Vol. 102. – № 433.
385. Trenberth K. E. Indices of El Niño evolution / K. E. Trenberth, D. P. Stepaniak // *Journal of Climate*. – 2001.
386. Tropical sea surface temperatures for the past four centuries reconstructed from coral archives / J. E. Tierney, N. J. Abram, K. J. Anchukaitis [et al.] // *Paleoceanography*. – 2015. – Vol. 30. – № 3.
387. Two decades of glacier mass loss along the Andes / I. Dussailant, E. Berthier, F. Brun [et al.] // *Nature Geoscience*. – 2019. – P. 1-7.
388. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset / I. Harris, P. D. Jones, T. J. Osborn, D. H. Lister // *International Journal of Climatology*. – 2014. – Vol. 34. – № 3. – P. 623-642.
389. Upward Treeline Shifts in Two Regions of Subarctic Russia Are Governed by Summer Thermal and Winter Snow Conditions / A. A. Grigoriev, Y. V. Shalaumova, S. O. Vyukhin [et al.] // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 2.
390. Vaganov E. A. How Well Understood Are the Processes that Create Dendroclimatic Records? A Mechanistic Model of the Climatic Control on Conifer Tree-Ring Growth Dynamics / E. A. Vaganov, K. J. Anchukaitis, M. N. Evans. – 2011. – 37-75 p.
391. Vaganov, E. A. *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future* / E. A. Vaganov, M. K. Hughes, A. V. Shashkin. – Dordrecht: Springer, 2006. – 368 p.

392. Variations in the intrinsic water-use efficiency of north Patagonian forests under a present climate change scenario: tree age, site conditions and long-term environmental effects / J. G. Arco Molina, G. Helle, M. A. Hadad, F. A. Roig // *Tree physiology*. – 2019. – Vol. 39. – № 4. – P. 661-678.
393. Veblen, T. T. Ecology of southern Chilean and Argentinian Nothofagus forests / T. T. Veblen, C. Donoso, T. Kitzberger, A.J. Rebertus. // *The Ecology and Biogeography of Nothofagus Forests* / Eds. T. T. Veblen, R. S. Hill, J. Read. – New Haven: Yale University Press, 1996. – P. 293-353.
394. Velichko A. A. Climate and vegetation dynamics in the tundra and forest zone during the Late Glacial and Holocene / A. A. Velichko, A. A. Andreev, V. A. Klimanov // *Quaternary International*. – 1997. – Vols. 41-42. – № 96. – P. 71-96.
395. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset / I. Harris, T. J. Osborn, P. Jones, D. Lister // *Scientific Data*. – 2020. – Vol. 7. – № 1. – P. 1-4.
396. Viale M. Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds / M. Viale, R. Garreaud // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2015. – Vol. 120. – № 10. – P. 4962-4974.
397. Villagrán C. M. Quaternary history of the Mediterranean vegetation of Chile / C. M. Villagrán // *Ecology and biogeography of Mediterranean ecosystems in Chile, California, and Australia*. – Springer, 1995. – P. 3-20.
398. Villalba R. Influences of large-scale climatic variability on episodic tree mortality in northern Patagonia / R. Villalba, T. T. Veblen // *Ecology*. – 1998. – Vol. 79. – № 8. – P. 2624-2640.
399. Visbeck M. A station-based southern annular mode index from 1884 to 2005 / M. Visbeck // *Journal of Climate*. – 2009.
400. Volcanic influence on centennial to millennial Holocene Greenland temperature change / T. Kobashi, L. Menviel, A. Jeltsch-Thömmes [et al.] // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – № 1.
401. Volcano-induced regime shifts in millennial tree-ring chronologies from northeastern North America / F. Gennaretti, D. Arseneault, A. Nicault [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2014. – Vol. 111. – № 28. – P. 10077-10082.

402. VS-oscilloscope: A new tool to parameterize tree radial growth based on climate conditions / V. V. Shishov, I. I. Tychkov, M. I. Popkova [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2016. – Vol. 39. – P. 42-50.
403. Warm-season temperatures since 1600 BC reconstructed from Tasmanian tree rings and their relationship to large-scale sea surface temperature anomalies / E. R. Cook, B. M. Buckley, R. D. D'Arrigo, M. J. Peterson // *Climate Dynamics*. – 2000. – Vol. 16. – № 2-3. – P. 79-91.
404. Warren W. G. Dynamic standardization of tree-ring series / W. G. Warren, D. C. Leblanc // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1990. – Vol. 20. – № 9.
405. Wigley T. M. L. On the average value of correlated time series with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. / T. M. L. Wigley, K. R. Briffa, P. D. Jones // *Journal of Climate & Applied Meteorology*. – 1984.
406. Winton M. Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? / M. Winton // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – Vol. 33. – № 3.
407. Woodhouse C. A. Artificial neural networks and dendroclimatic reconstructions: An example from the Front Range, Colorado, USA / C. A. Woodhouse // *Holocene*. – 1999. – Vol. 9. – № 5. – P. 521-529.
408. X-ray microdensitometry applied to subfossil tree-rings: Growth characteristics of ancient pines from the southern boreal forest zone in Finland at intra-annual to centennial time-scales / S. Helama, M. Vartiainen, T. Kolström [et al.] // *Vegetation History and Archaeobotany*. – 2008. – Vol. 17. – № 6.

## Приложение

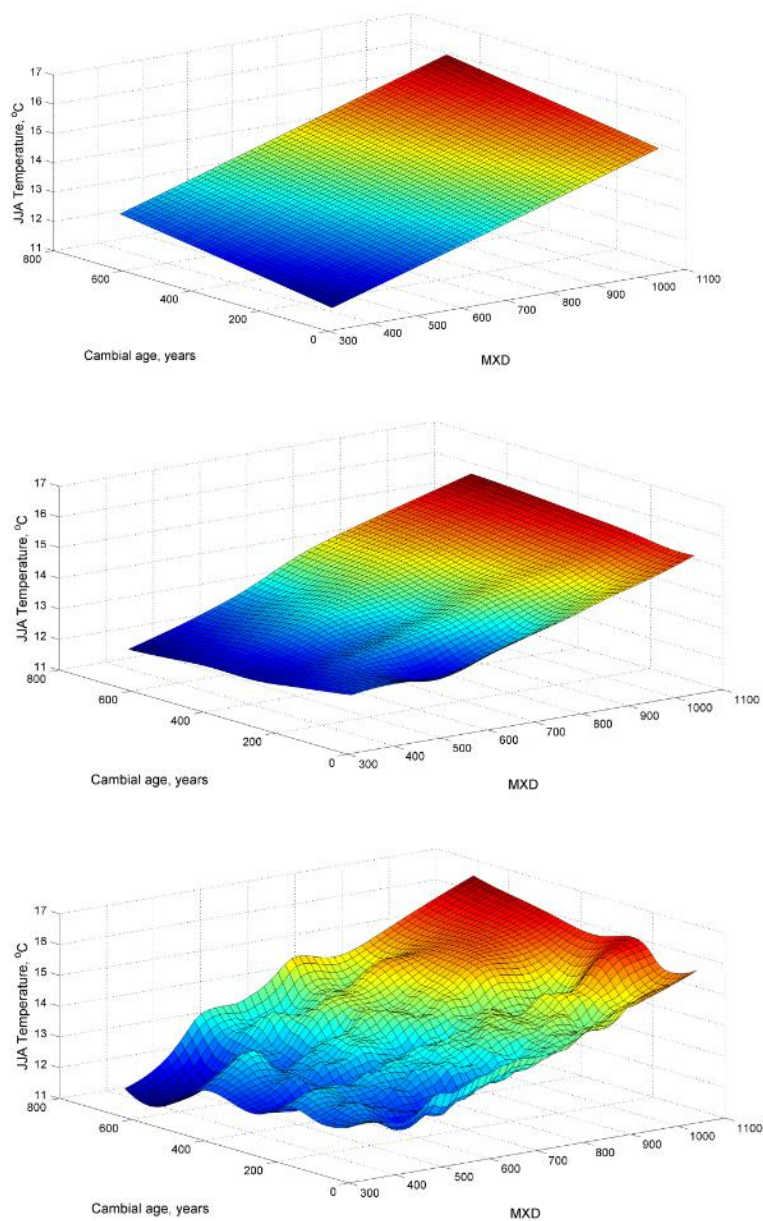


Рисунок ПЗ.1 – Моделирование 3D-поверхностей отклика для камбиального возраста, MXD и климатических данных с различными параметрами сглаживания  $p$  для метода DIRECT. Сверху –  $p=8*10^{-10}$ , плохо настроен; В центре –  $p=8*10^{-7}$ , правильно настроен (значение параметра  $p$  использовано для реконструкции); Снизу –  $p=8*10^{-5}$ , перенастройка.

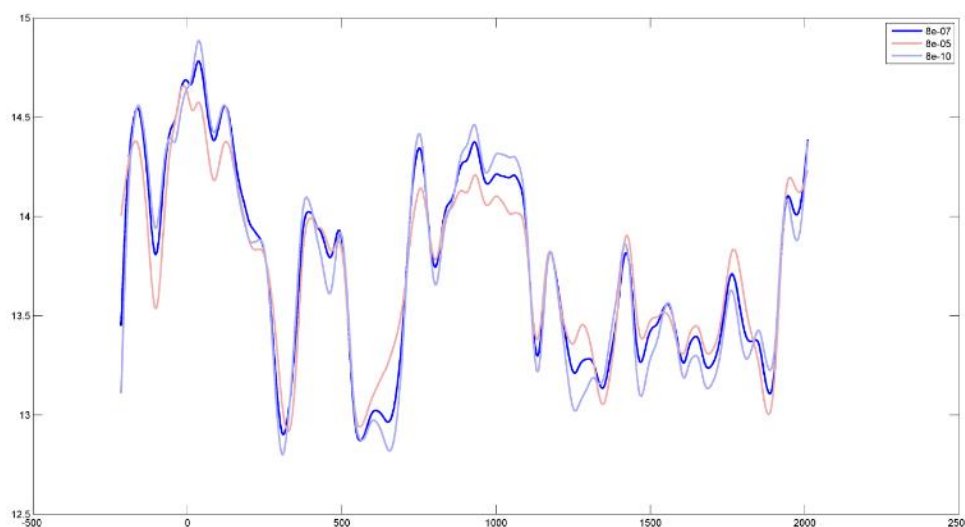


Рисунок ПЗ.2 – Экспериментальные реконструкции летней (ИИА) температуры, рассчитанные с использованием различных значений сглаживания при моделировании 3D поверхности отклика (см. Рисунок ПЗ.1) методом DIRECT.

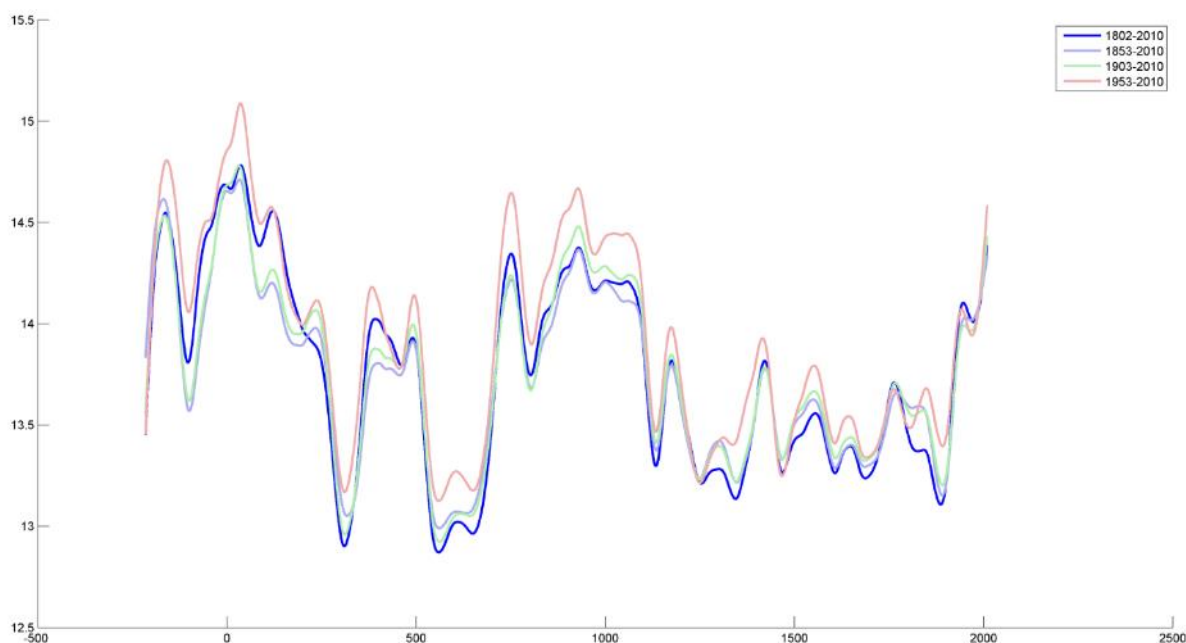


Рисунок ПЗ.3 – Экспериментальные реконструкции летней (ИИА) температуры, рассчитанные с использованием инструментальных данных для различных интервалов (1802-2010 гг., 1853-2010 гг., 1903-2010 гг. и 1953-2010 гг.) методом DIRECT.



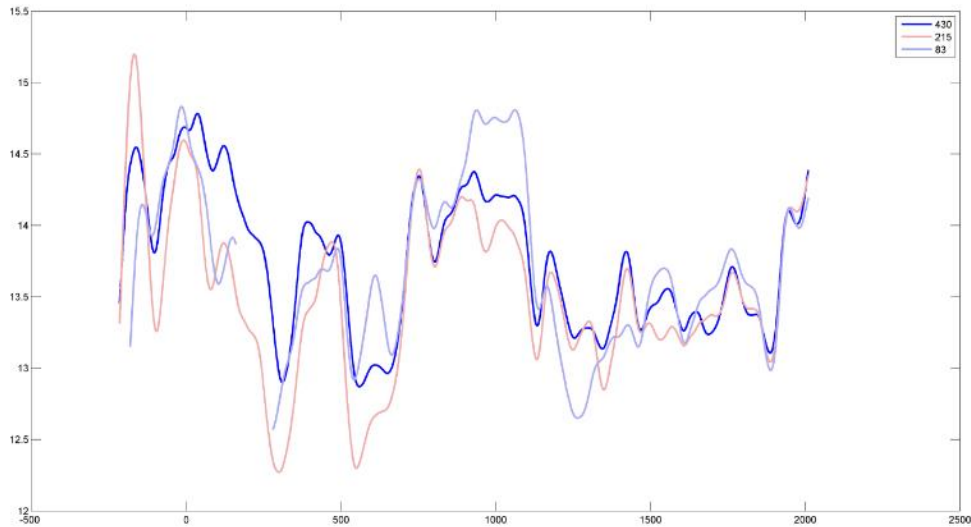


Рисунок ПЗ.4 – Экспериментальные реконструкции летней (ИИА) температуры, рассчитанные по разному количеству деревьев. 83 и 215 деревьев, что составляет 20% и 50% от полного размера выборки (430 деревьев), было выбрано случайным образом. Реконструкции построены методом DIRECT.

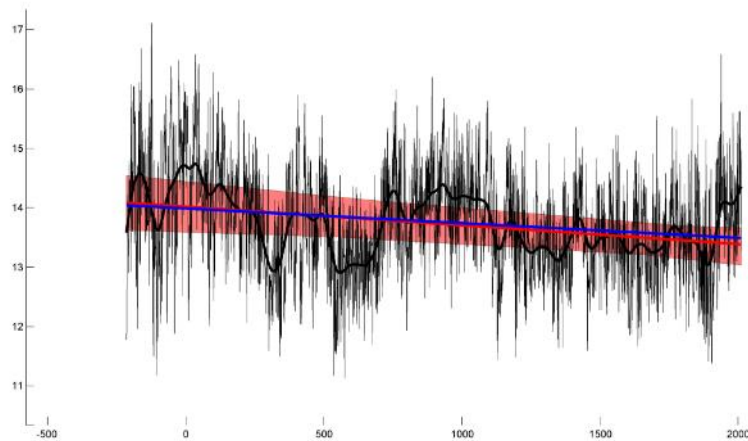


Рисунок ПЗ.5 – Оценка долгосрочной линии тренда (216 г. до н.э. - 2010 г. н.э.) для реконструкции методом DIRECT. Годовые значения реконструкции DIRECT (тонкая черная линия), долгопериодная изменчивость реконструкции (толстая черная линия), линейный тренд для реконструкции (красная линия), 95% доверительный интервал для линии тренда (красная заливка). Для сравнения также показана линия тренда (216 г. до н.э. - 2010 г. н.э.), рассчитанная по реконструкции (Matskovsky and Helama, 2014) на основе того же набора данных (синяя линия).

Таблица П5.1.

Древесно-кольцевые хронологии, использованные в главе 5.

№	Код площадки	Название площадки	Широта	Долгота	Высота	Ориентация склона	Вид	Число кернов	Первый год	Последний год	Источник
1	ABL	Aguas Blancas	-54.61	-67.09	520	N-NW	<i>N. pumilio</i>	73	1801	2016	1,*
2	BOQ	Ea. Boquerón	-54.33	-68.17	450	-	<i>N. pumilio</i>	51	1675	1999	1
3	BRI	Sierra Bridges	-54.73	-67.81	500	SW	<i>N. pumilio</i>	81	1675	2016	1,*
4	BRO	Bronsovich	-54.60	-66.51	199	-	<i>N. pumilio</i>	26	1715	2005	1
5	CAR	Valle Carbajal	-54.73	-68.21	250	NE	<i>N. pumilio</i>	42	1683	1994	4
6	COR	Co. Cornu	-54.79	-67.62	500	S-SW	<i>N. pumilio</i>	40	1720	2003	1
7	CUC	Co. Cuchillo	-54.80	-67.61	500	-	<i>N. pumilio</i>	81	1700	2016	1,*
8	ECC	Ea. Carmen	-54.42	-67.86	250	-	<i>N. pumilio</i>	95	1726	2016	2,*
9	ELC	Ea. La Correntina	-54.55	-67.00	300	-	<i>N. pumilio</i>	16	1684	1998	1
10	EMC	Ea. M. Cristina	-54.50	-67.08	300	-	<i>N. pumilio</i>	29	1743	1986	2
11	ESJ	Ea. San Justo	-54.05	-68.57	250	-	<i>N. pumilio</i>	65	1723	1985	2
12	GM1	Le Martial 150-250	-54.80	-68.37	200	-	<i>N. pumilio</i>	16	1705	1995	1
13	GM2	Le Martial 300-400	-54.80	-68.37	350	-	<i>N. pumilio</i>	13	1648	1995	1
14	GM3	Le Martial 450-500	-54.80	-68.38	475	N	<i>N. pumilio</i>	15	1695	1995	1
15	GM	Le Martial	-54.80	-68.37	300	-	<i>N. pumilio</i>	44	1648	1995	1
16	GUA	Co. Guanaco	-54.82	-68.55	450	W	<i>N. pumilio</i>	25	1770	2002	1
17	H19	Hito XIX	-54.13	-68.60	350	E	<i>N. pumilio</i>	43	1659	1999	1
18	HAR	Ea. Harberton	-54.87	-67.34	30	-	<i>N. pumilio</i>	23	1736	1985	2
19	HEW	Co. Hewhuepen	-54.59	-67.24	600	SW	<i>N. pumilio</i>	113	1709	2016	1,*
20	KRS	Krond Southern slope	-54.72	-68.00	330	S	<i>N. pumilio</i>	123	1700	2002	3
21	KRN	Krond Northern slope	-54.72	-68.00	330	N	<i>N. pumilio</i>	111	1725	2002	3
22	KRU	Krond	-54.72	-68.00	460	S	<i>N. pumilio</i>	24	1726	1997	3
23	KR1	Krond N220 (KR1)	-54.72	-68.02	210	N	<i>N. pumilio</i>	31	1792	2002	3

24	KR2	Krund N330 (KR2)	-54.72	-68.01	330	N	<i>N. pumilio</i>	29	1725	2002	3
25	KR3	Krund N460 (KR3)	-54.73	-68.02	460	N	<i>N. pumilio</i>	25	1744	2002	3
26	KR4	Krund N550 (KR4)	-54.74	-68.02	550	N	<i>N. pumilio</i>	26	1769	2002	3
27	KR5	Krund S220 (KR5)	-54.72	-68.02	220	S	<i>N. pumilio</i>	28	1773	2002	3
28	KR6	Krund S330 (KR6)	-54.72	-68.01	330	S	<i>N. pumilio</i>	29	1700	2002	3
29	KR7	Krund S460 (KR7)	-54.72	-68.00	460	S	<i>N. pumilio</i>	32	1712	2002	3
30	KR8	Krund S550 (KR8)	-54.72	-67.99	550	S	<i>N. pumilio</i>	34	1803	2002	3
31	LE2	Lago Escondido (2)	-54.65	-67.82	550	NW	<i>N. pumilio</i>	13	1704	1998	1
32	LP3	LP3	-54.53	-66.81	248	-	<i>N. pumilio</i>	21	1731	2005	1
33	MBR	Mte. Brown	-54.86	-67.59	430	-	<i>N. pumilio</i>	34	1710	2003	1
34	MIC	Microondas	-54.41	-67.50	700	-	<i>N. pumilio</i>	20	1664	1984	2
35	NOT	Co. No Top	-54.88	-67.16	450	S	<i>N. pumilio</i>	49	1704	2003	1
36	OBS	Co. Observación	-54.63	-67.03	500	SW	<i>N. pumilio</i>	40	1691	2003	1
37	PAR	Parcela 139	-54.60	-66.55	255	-	<i>N. pumilio</i>	14	1732	2005	1
38	PG	Paso Garibaldi II	-54.69	-67.84	500	W	<i>N. pumilio</i>	56	1740	2016	2,*
39	RCL	Río Claro	-54.47	-67.76	150	-	<i>N. pumilio</i>	32	1739	1986	2
40	VAH*	Valle Andorra (High)	-54.74	-68.37	500	S	<i>N. pumilio</i>	63	1782	2016	1,*
41	VAL	Valle Andorra (Low)	-54.75	-68.34	250	-	<i>N. pumilio</i>	32	1594	1985	2
42	VALN	Valle Andorra 2 (Low)	-54.75	-68.34	250	SW	<i>N. pumilio</i>	42	1803	2016	7
43	YEH	Lago Yehuin	-54.47	-67.72	200	-	<i>N. pumilio</i>	25	1731	1986	2
44	YEN	Co. Yenosh	-54.39	-67.70	450	SE	<i>N. pumilio</i>	59	1734	2016	1,*
45	LRB	Lago Robalo	-54.97	-67.68	300	SE	<i>N. betuloides</i>	98	1489	2008	6
46	VD2	Valle de los divorcios	-54.58	-69.08	270	SW, S	<i>N. betuloides</i>	47	1714	2012	5
47	ST	Lote 10	-54.20	-68.78	230	N	<i>N. betuloides</i>	175	1643	2011	5
48	NZ	Nueva Zelanda	-54.70	-69.47	80	W, NW	<i>N. betuloides</i>	22	1810	2012	5
49	DP	Depreciado	-54.35	-68.80	250-400	N	<i>N. betuloides</i>	78	1643	2011	5
50	DF2	Deseado Fagnano	-54.35	-68.70	300-400	W	<i>N. betuloides</i>	42	1646	2011	5
51	ALE	Alejandro Valley	-53.68	-72.45	120	SE, E	<i>N. betuloides</i>	25	1512	2010	5
52	YORK	Bahia York	-54.83	-64.33	60	-	<i>N. betuloides</i>	29	1647	1986	2

53	VAN	Paso Vancouver	-54.78	-64.06	10	W	<i>N. betuloides</i>	19	1829	2004	1
54	RPI	Rio Pipo	-54.83	-68.47	50	-	<i>N. betuloides</i>	30	1657	1984	2
55	RMO	Rio Moat	-54.90	-66.93	50	-	<i>N. betuloides</i>	24	1528	1986	2
56	RMA	Rio Malenguena	-54.52	-66.17	15	-	<i>N. betuloides</i>	42	1705	1986	2
57	PARRY	Puerto Parry	-54.83	-64.37	20	-	<i>N. betuloides</i>	25	1726	1986	2
58	LE	Lago Escondido 1	-54.65	-67.87	700	-	<i>N. betuloides</i>	56	1575	1984	2
59	CROS	Bahia Crossley	-54.83	-64.67	20	-	<i>N. betuloides</i>	35	1715	2005	1,2
60	COOK	Cook	-54.77	-64.05	100	SE	<i>N. betuloides</i>	25	1743	2004	1
61	COL	Colnett	-54.72	-64.33	0	-	<i>N. betuloides</i>	30	1746	2005	1
62	BS	Buen Suceso	-54.70	-65.20	35	-	<i>N. betuloides</i>	17	1751	1986	2
63	SJS	SJ Salvamento	-54.75	-63.89	40-50	SE	<i>N. betuloides</i>	27	1740	2004	1

**Источники мета-данных:** 1: Roig et al (2010); 2: Boninsegna et al. (1989); 3: Masachesi et al (2008); 4: Roig et al (1996); 5: Fuentes et al. (2019); 6: Llancabure (2011); 7: Matskovsky et al. (2019); \*: обновлены в Matskovsky et al. (2019)

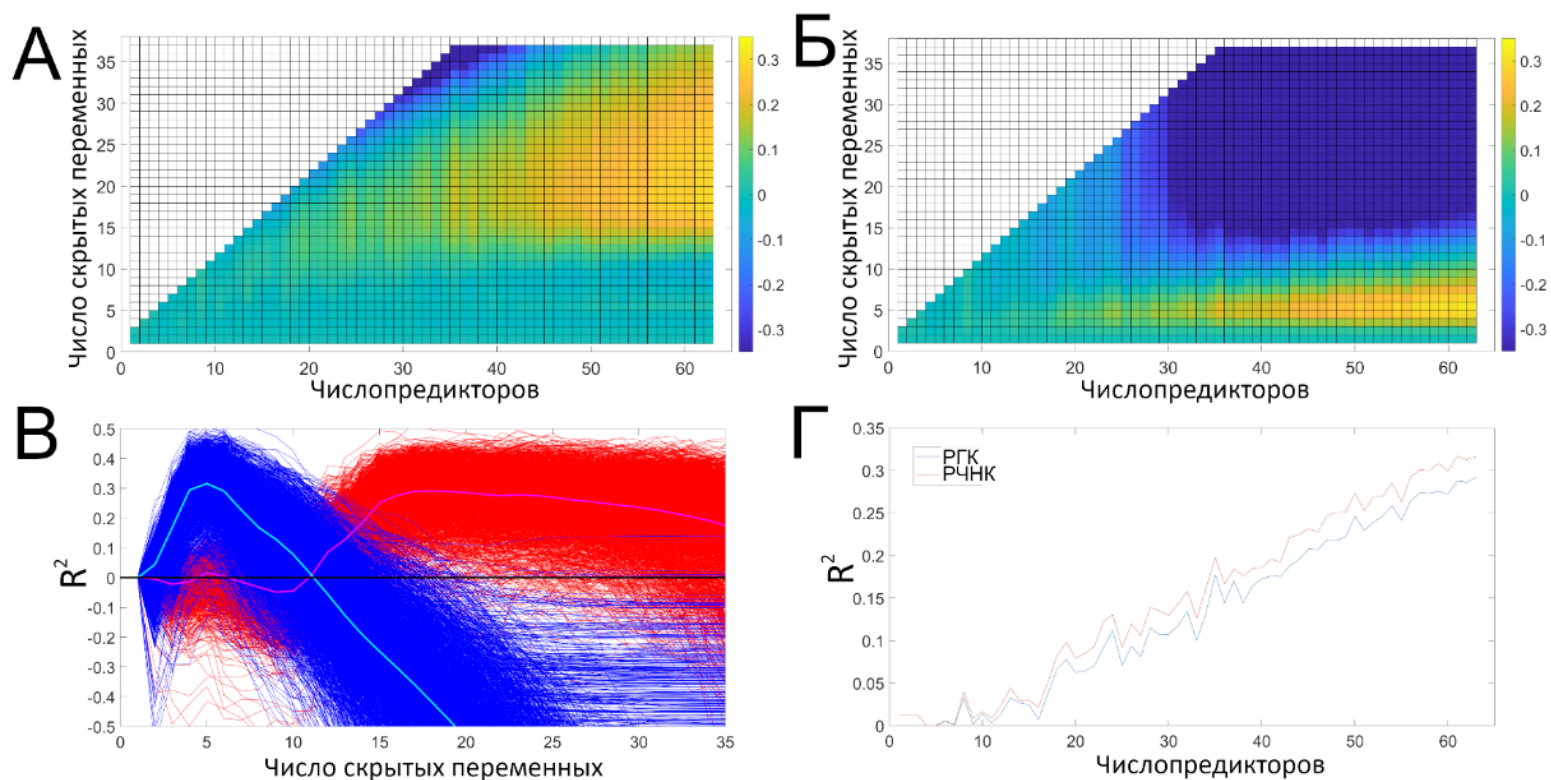


Рисунок П5.1 - Зависимость значений  $R^2$  от количества предикторов и количества скрытых переменных. А – Результаты для РГК, Б – результаты для РЧНК, В – Срез по рисунку П5.1А и Б для максимального количества предикторов ( $N=63$ ) для РГК (красный) и РЧНК (синий). Тонкие линии показывают отдельные эксперименты, жирные линии – среднее значение для всех экспериментов. Г – Максимальные значения объясненной дисперсии по рисункам П5.1А и Б.

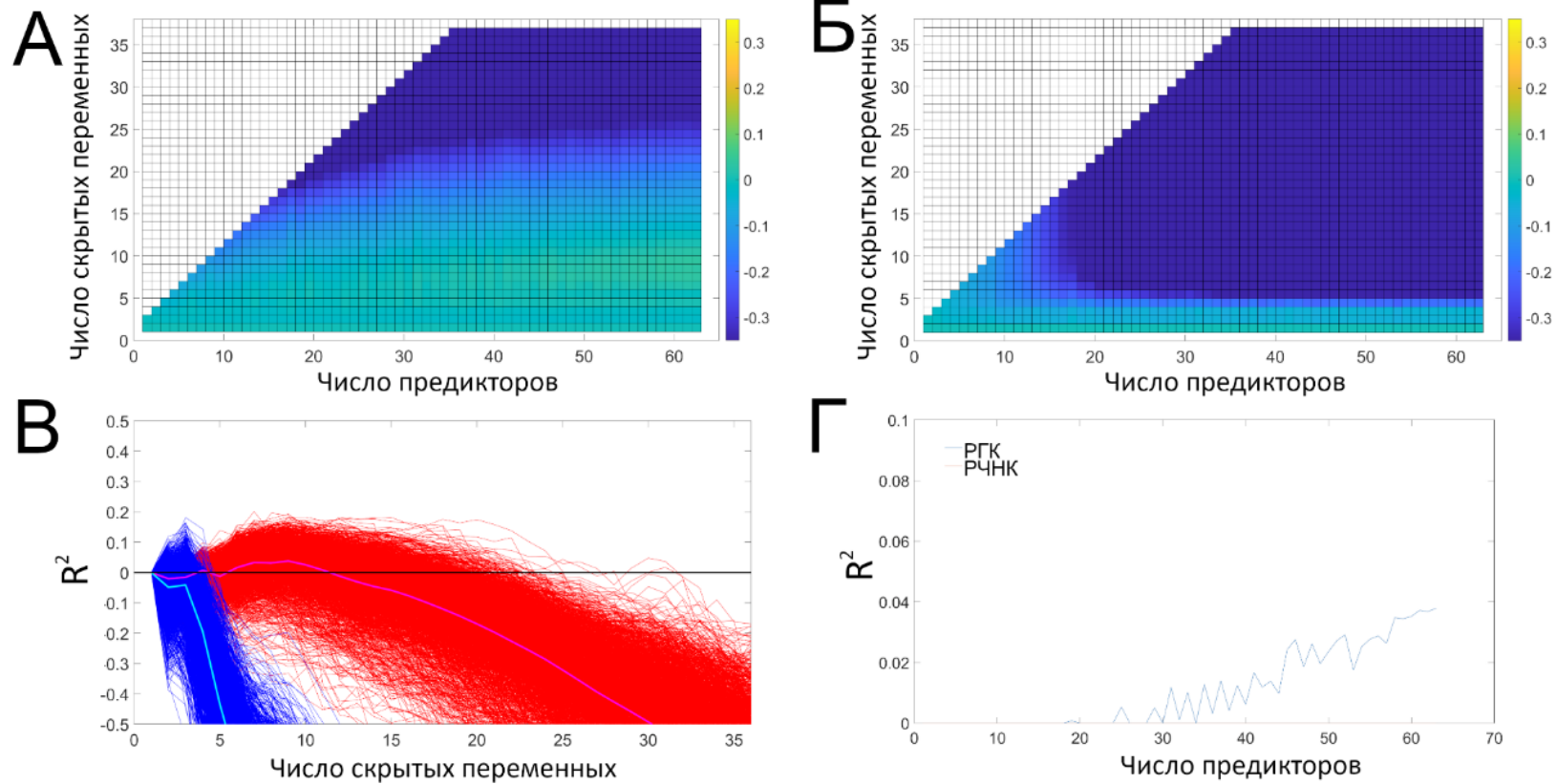


Рисунок П5.2 - Как на рис. П5.1, но для случайно перемешанного ряда значений целевой переменной. Поскольку ряд температур перемешан случайным образом, древесно-кольцевые предикторы не должны предсказывать ее хорошо, и любые положительные значения  $R^2$  должны предупреждать о переобучении и/или неправильно выбранном алгоритме валидации. Здесь признаков переобучения не наблюдается для РЧНК и лишь незначительное переобучение для РГК.

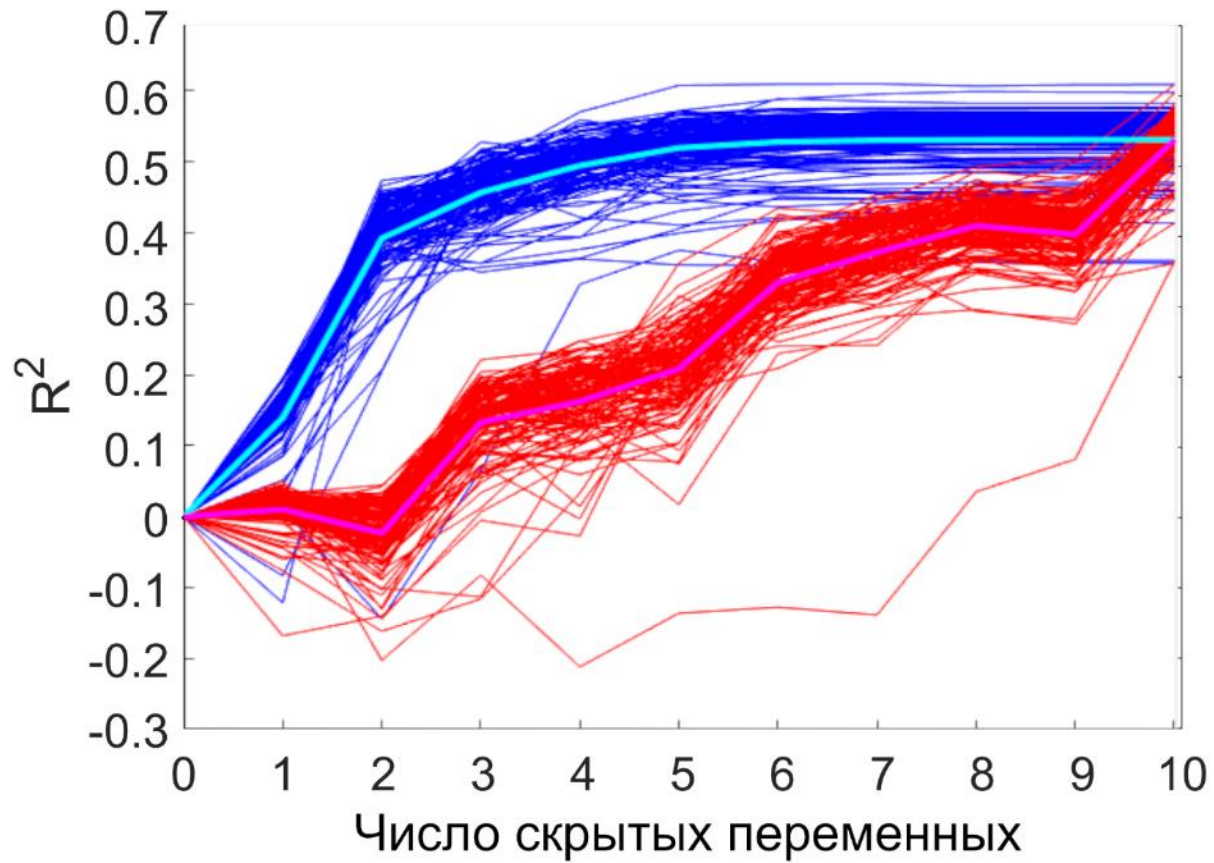


Рисунок П5.3 – Пример изменения значений  $R^2$  в зависимости от количества скрытых переменных для РГК (красный) и РЧНК (синий) для 10 предикторов. Тонкие линии показывают отдельные эксперименты, жирные линии – среднее значение для всех экспериментов. Использован один набор из 10 «хороших» предикторов.

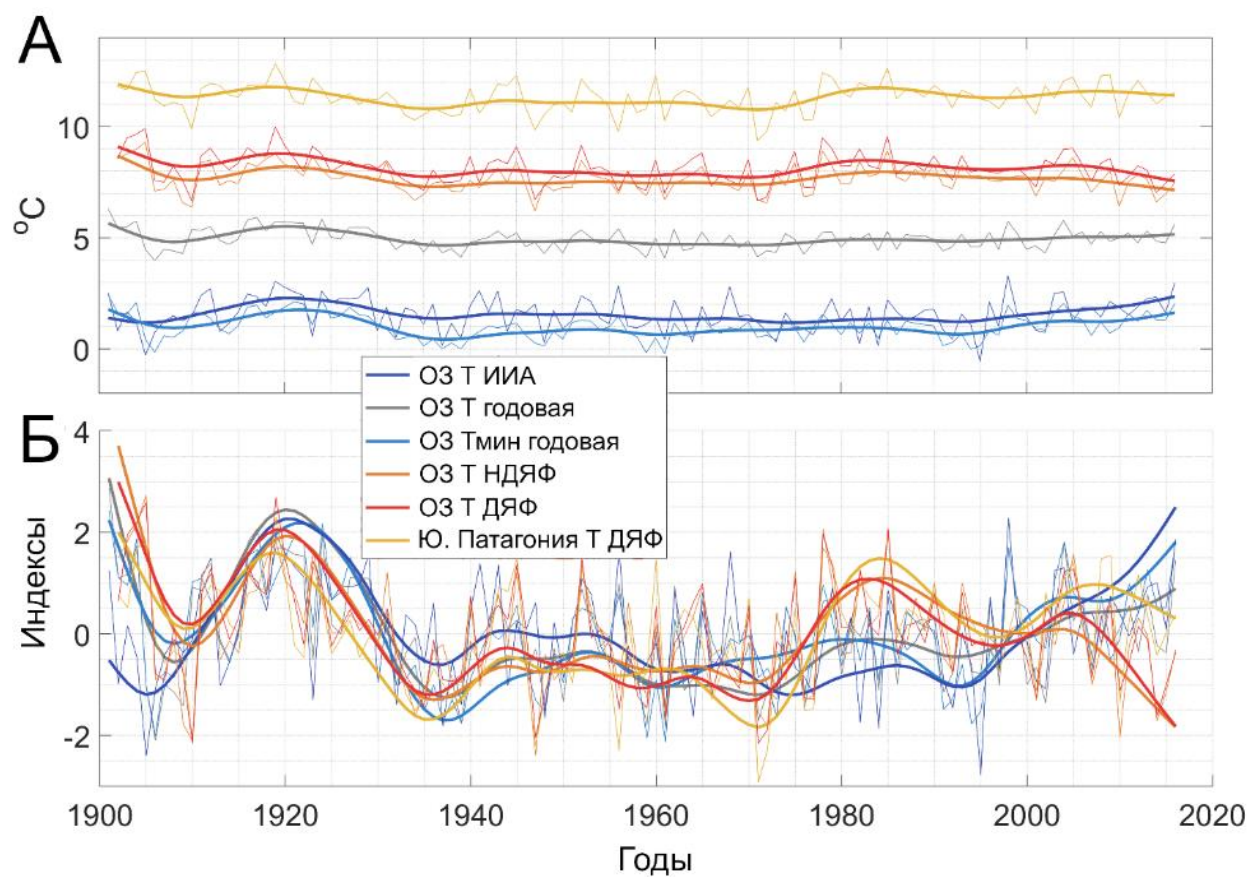


Рисунок П5.4 – Сравнение инструментальных рядов температуры для Огненной Земли и Южной Патагонии. Средняя ноябрь-февраль (НДЯФ), декабрь-февраль (ДЯФ), июнь-август (ИИА) и годовая температура для Огненной Земли (ОЗ), среднегодовая и минимальная месячная температура (Тмин) для ОЗ и температура ДЯФ для Южной Патагонии (южнее  $45^{\circ}$  ю.ш.). А – Фактические значения Б – нормированные значения. Тонкие линии — годовые значения, жирные линии — 20-летние сглаживающие сплайны.



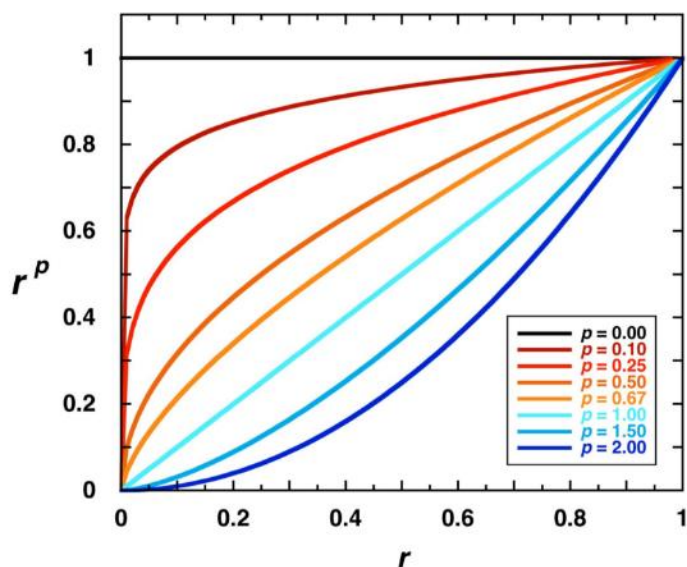


Рисунок Пб.1 – График, показывающий функциональные формы взвешивания  $r^p$ , примененные к древесно-кольцевым хронологиям на основе их корреляций со значениями реконструируемого scPDSI в заданной точке сетки. Для каждого радиуса поиска было применено восемь значений степени для взвешивания.

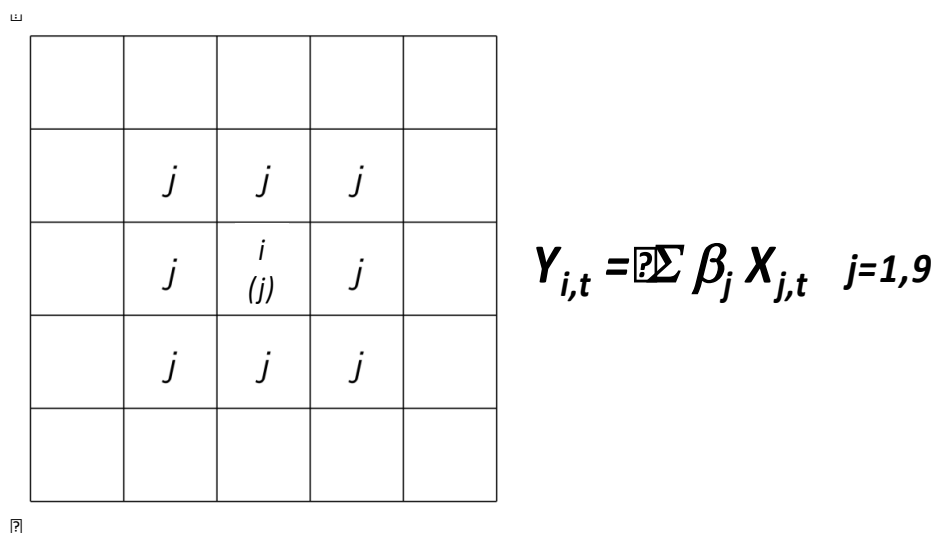


Рисунок Пб.2 – Схема сглаживания по типу ферзя (QCIS). QCIS действует как 9-точечное ядро регрессии, которое повторно оценивает значения реконструкции  $Y_i$  центральной точки сетки для каждого года  $t$  с использованием  $j=1,9$  предыдущих реконструкций EPPR в качестве предикторов в РГК. Бета-коэффициенты регрессии ( $\beta_j$ ) 9 реконструкций, в том числе для центральной точки сетки, определяют относительный вес предикторов для реконструкции центральной точки сетки. На границах области число предикторов будет меньше 9.

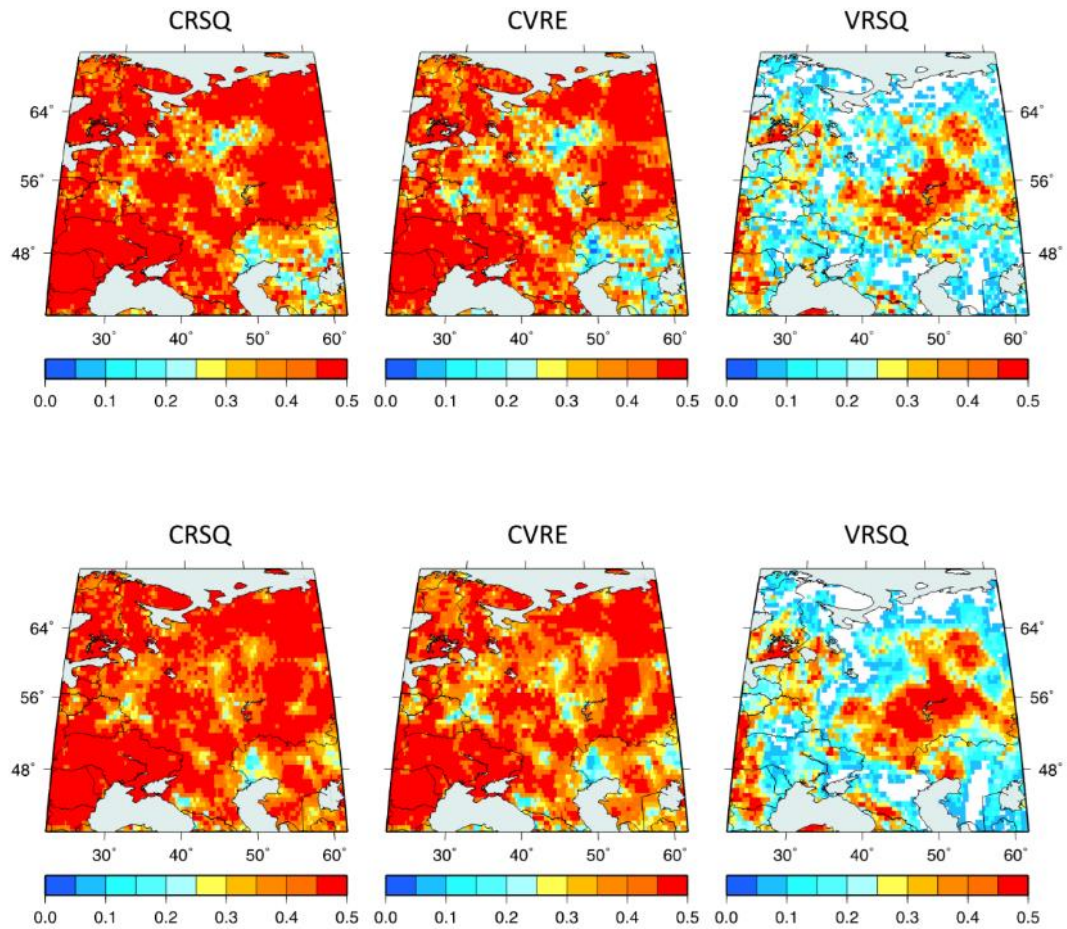


Рисунок Пб.3 – Влияние сглаживания QCIS на статистику калибровки/валидации CRSQ, CVRE и VRSQ атласа ERDA. Как и ожидалось, после применения QCIS (снизу) исходные поля (сверху) стали более гладкими, но основные характеристики в целом остались прежними. Область с высоким качеством валидации ( $VRSQ > 0,3$ ), тем не менее, заметно расширилась после применения сглаживания QCIS.

Таблица П8.1.

Климатическая характеристика площадок, исследованных в главе 8.

Порода	Код	Широта	Долгота	Высота (м н.у.м.)	Годовые осадки (мм)	Среднегодовая температура (°С)
<i>N. macrocarpa</i>	PLC	32°57.7'	71°07.5'	1,280	395.2	12.9
<i>N. macrocarpa</i>	SER	33°00.5'	71°01.5'	1,600	464.4	13.0
<i>N. macrocarpa</i>	SAC	33°55.1'	70°58.5'	1,800	841.6	13.3
<i>N. macrocarpa</i>	RRL	34°07.6'	70°57.9'	1,090	832.5	12.7
<i>N. macrocarpa</i>	SAH	34°51.9'	70°40.2'	1,550	1,384.6	10.3
<i>N. macrocarpa</i>	PST	35°27.9'	70°58.7'	1,318	1,693.3	10.0
<i>A. chilensis</i>	ELA	32°38.9'	70°48.6'	1878	313.4	13.9
<i>A. chilensis</i>	GAB	33°46.2'	70°15.0'	1,480	626.8	12.4
<i>A. chilensis</i>	ELB	34°29.3'	70°26.3'	1813	1,200.5	10.2
<i>A. chilensis</i>	ISA	34°46.7'	70°45.0'	1,302	1,108.1	13.1
<i>A. chilensis</i>	MES	34°55.2'	70°42.0'	1,020	1,433.7	9.8
<i>A. chilensis</i>	ANI	35°54.5'	71°16.7'	1,050	1,664.1	11.5

Таблица П8.2.

Результаты обработки в программе ARSTAN региональных хронологий *Nothofagus macrocarpa* и *Austrocedrus chilensis*. АКФ – автокорреляция.

<i>Nothofagus macrocarpa</i>											
	Сред нее	СКО	Асиммет рия	Экцесс	Ср. чувствит ельность	Ср. rbar					
	0.98 5	0.349	2.478	14.176	0.180	0.18 9					
Запазды вание	t-1	t-2	t-3	t-4	t-5	t-6	t-7	t-8	t-9	t-10	
АКФ	0.68 6	0.550	0.474	0.418	0.357	0.28 3	0.23 7	0.23 2	0.26 5	0.23 8	
Част. АКФ	0.68 6	0.149	0.097	0.060	0.008	-0.04	0.00 1	0.06 4	0.12 1	-0.01	
<i>Austrocedrus chilensis</i>											
	Сред нее	СКО	Асиммет рия	Экцесс	Ср. чувствит ельность	Ср. rbar					
	1.19 2	0.547	2.650	14.053	0.156	0.28 3					
Запазды вание	t-1	t-2	t-3	t-4	t-5	t-6	t-7	t-8	t-9	t-10	
АКФ	0.87 8	0.811	0.791	0.758	0.728	0.72 6	0.71 3	0.68 3	0.67 3	0.66 3	
Част. АКФ	0.87 8	0.177	0.224	0.043	0.051	0.13 7	0.04 2	-0.03	0.06 0	0.02 4	

Таблица П8.3.

Априорные и апостериорные оценки параметров модели VS-Lite.

Параметр	Априорное распределение	<i>Nothofagus macrocarpa</i>			<i>Austrocedrus chilensis</i>		
		Апостериорная медиана			Апостериорная медиана		
		Период калибровки			Период калибровки		
		1901-1957	1958-2014	1901-2014	1901-1957	1958-2014	1901-2014
T1, °C	4-парам. бета, [9 5 0 9]	5.6608	2.3589	3.3117	7.1087	3.5716	2.2259
T2, °C	4-парам. бета, [3.5 3.5 10 24]	10.5199	11.0821	10.2667	10.5936	10.5159	10.7424
M1, v/v	4-парам. бета, [1.5 2.8 0.0 0.1]	0.0005	0.0963	0.0601	0.0059	0.0861	0.0324
M2, v/v	4-парам. бета, [1.5 2.5 0.1 0.5]	0.1197	0.4597	0.4477	0.4726	0.4161	0.4866
Сток 1, месяц <sup>-1</sup>	0.093						
Сток 2	5.8						
Сток 3	4.886						
Максимальный водозапас почвы, v/v	0.76				Не оцениваются		
Минимальный водозапас почвы, v/v	0.01				Не оцениваются		
Глубина корней, мм	1000						
Начало сезона	-3 (апрель)						
Конец сезона	10 (март)						

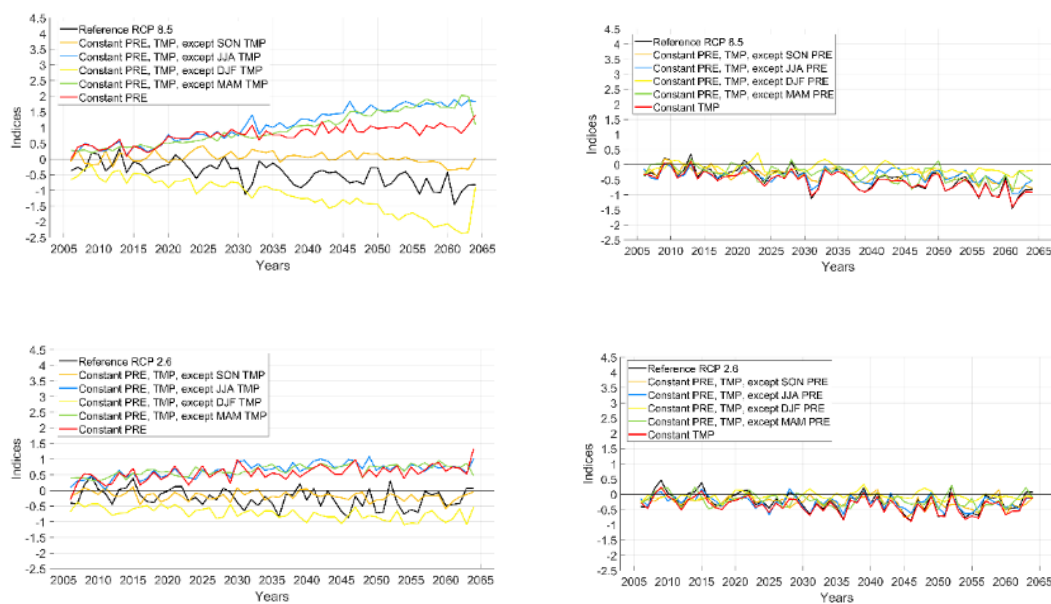


Рисунок П8.1 – Прогнозы роста деревьев в условиях с фиксацией значений температуры и/или осадков для разных сезонов.

Левые панели — осадки (PRE) постоянны, а температура (TMP) меняется в соответствии с результатами климатического моделирования. Правые панели – температура постоянна, а осадки меняются в соответствии с результатами климатического моделирования. Верхние панели – сценарий 8.5, нижние панели – сценарий 2.6.

Черные линии показывают эталонные эксперименты, в которых и температура, и осадки изменяются в соответствии с результатами климатического моделирования. Красные линии – один из параметров (температура или осадки) фиксируется как среднемесячное значение за исторический период (1950-2005 гг.), а другой параметр изменяется. Оранжевые линии – меняется температура или осадки только за сентябрь, октябрь, ноябрь (SON), остальные параметры фиксированы. Синие линии – меняется температура или осадки только за июнь, июль, август (JJA). Желтые линии – меняется температура или осадки только за декабрь, январь, февраль (DJF). Зеленые линии – меняется температура или осадки только за март, апрель, май (MAM). Остальные параметры фиксируются как среднемесячные значения за исторический период (1950-2005 гг.).

*N. macrocarpa* и *A. chilensis* неразличимы с точки зрения модельного роста деревьев.

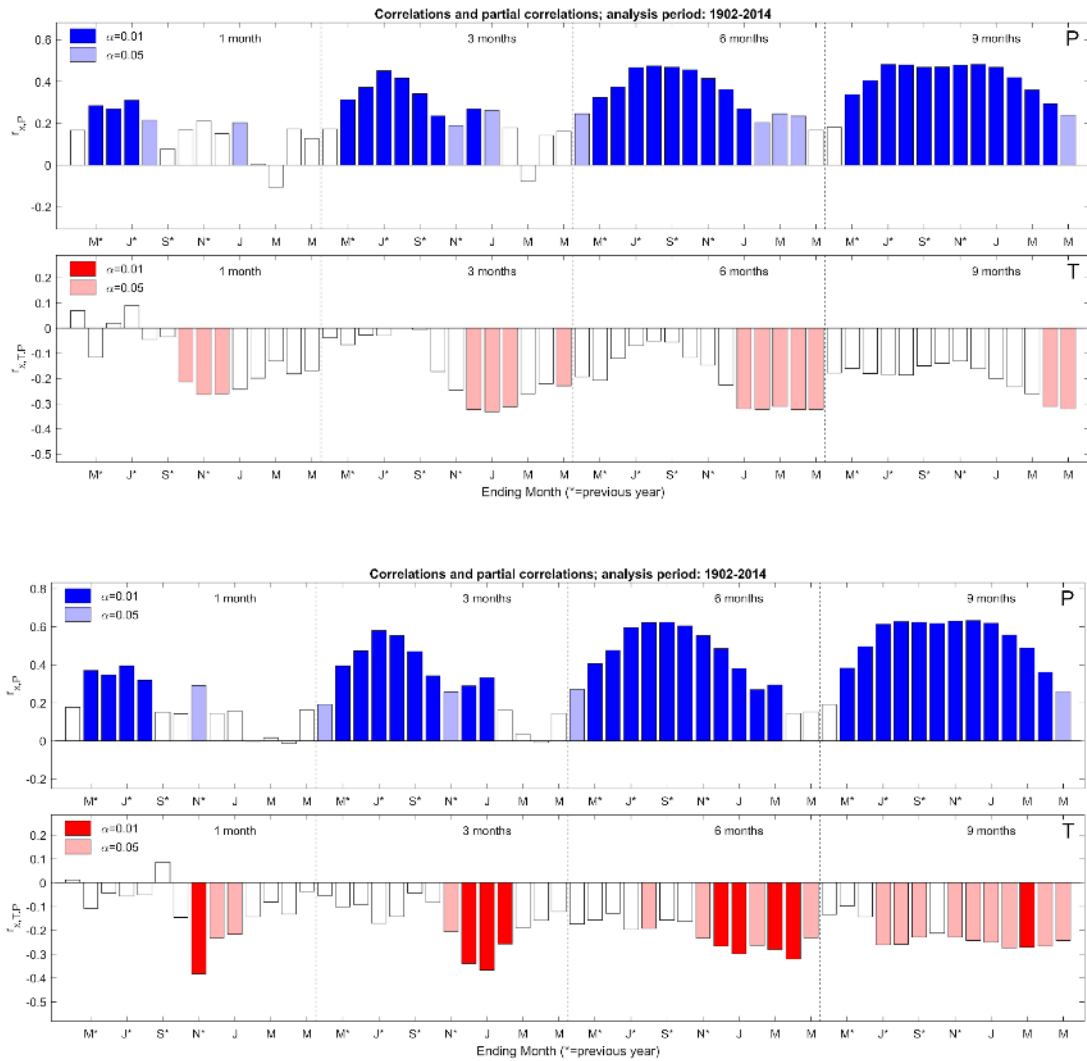


Рисунок П8.2 – Результаты расчета корреляций и частных корреляций с первичной (осадки, P) и вторичной (температура, T) климатическими переменными в программе Seascorr (Meko et al., 2011: doi:10.1016/j.cageo.2011.01.013) для *N. macrocarpa* (сверху) and *A. chilensis* (снизу).