ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

на правах рукописи

But

Чуракова Ольга Владимировна

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В ВЫСОКОШИРОТНЫХ И ВЫСОКОГОРНЫХ РАЙОНАХ ЕВРАЗИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА В ГОДИЧНЫХ КОЛЬЦАХ ХВОЙНЫХ

03.02.08 «Экология (биология) (биологические науки)»

Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук

Научный консультант:

доктор биологических наук, профессор

Ваганов Евгений Александрович

Красноярск - 2018

оглавление

Введение	9
ГЛАВА 1. Стабильные изотопы углерода и кислорода в годичных кольцах	
деревьев в палеоклиматологических и экофизиологических	
исследованиях	17
1.1. Стабильные изотопы углерода в годичных кольцах деревьев	18
1.2. Стабильные изотопы кислорода в годичных кольцах деревьев	21
1.3. Стабильные изотопы углерода и кислорода, как двойной подход к	
интерпретации экофизиологического и климатического сигналов	24
1.4. Применение экофизиологических и процессных моделей для	
интерпретации δ ¹³ С и δ ¹⁸ О в годичных кольцах хвойных	25
ГЛАВА 2. Материалы и методы исследования	26
2.1. Объекты и районы исследования	26
2.2. Характеристика исследуемых участков	32
2.2.1. Северо-восток Якутии (ҮАК)	32
2.2.2. Восточная часть полуострова Таймыр (ТАҮ)	35
2.2.3. Высокогорный Алтай. Монгун тайга (MOG)	39
2.3. Метеорологические данные	40
2.4. Отбор образцов древесины для анализа стабильных изотопов углерода и	
кислорода	42
2.4.1. Подготовка древесных образцов к анализу стабильных изотопов	
углерода и кислорода	43
2.4.2. Экстракция целлюлозы из годичных колец деревьев и подготовка	
образцов к анализу	45
2.5. Измерение стабильных изотопов углерода и кислорода	46
2.5.1. Корректировка данных по соотношению ¹³ C/ ¹² C и ¹⁸ O/ ¹⁶ O в целлюлозе	
годичных кольцах деревьев	47
2.5.2. Корректировка данных по соотношению ${}^{13}C/{}^{12}C$ относительно $\delta^{13}C$	
атмосферного СО2	47

2.5.3. Дополнительные корректировки данных по соотношению ¹³ C/ ¹² C	
относительно δ^{13} С атмосферного СО ₂ и «пин» коррекции 1, 2 порядка	47
2.6. Расчет эффективности использования воды древесными растениями	
(iWUE)	48
2.7. Методы и модели реконструкции климата	48
2.8. Применение экофизиологических моделей для описания погодичной	
изменчивости стабильных изотопов в годичных кольцах на примере деревьев	
лиственниц, произрастающих на северо-востоке Якутии	51
2.8.1. Модели, описывающие соотношение стабильных изотопов углерода в	
годичных кольцах деревьев	51
2.8.1.1. Модель - «б ¹³ С Орхидея»	51
2.8.1.2. Модель – LPX – Bern	52
2.8.1.3. Модель наземной биосферы (CLM 4.5)	54
2.8.1.4. Экофизиологическая имитационная модель Беньковой-Шашкина	
(BS)	54
2.8.2. Модели, описывающие соотношение стабильных изотопов кислорода в	
годичных кольцах	56
2.8.2.1. Механическая модель Роден-Лин-Элирингер (RLE)	57
2.8.2.2. Модель - «δ ¹⁸ О Орхидея»	59
ГЛАВА 3. Изменения климата и окружающей среды на северо-востоке	
Якутии	60
3.1. Изотопный состав (б ¹³ С, б ¹⁸ О) в древесине и целлюлозе годичных колец	
лиственниц Каяндера для средневекового и современного периодов	60
3.2. Построение длительных хронологий по δ^{13} С и δ^{18} О в целлюлозе годичных	
колец лиственниц Каяндера с 516 г. н. э. по 2004 г. н. э	67
3.3. Климатические факторы, оказывающие влияние на изменение соотношения	
стабильных изотопов углерода и кислорода в годичных	
кольцах	69

3.4. Реконструкции климата для северо-востока Якутии по данным стабильных	
изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец лиственниц	
Каяндера	69
3.4.1. Реконструкция температуры воздуха июля по данным $\delta^{13}C$ в	
целлюлозе	70
3.4.2. Реконструкция дефицита упругости водяного пара в июле по данным $\delta^{13}C$	
в целлюлозе	71
3.4.3. Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния в июле	
по данным δ ¹⁸ О в целлюлозе	73
3.5. Особенности климатических изменений на северо - востоке Якутии	74
3.6. Применение экофизиологических моделей в исследовании	
биогеохими ческих циклов растительных экосистем	75
3.6.1. Сравнительный анализ измеренных и моделируемых данных по	
стабильным изотопам углерода	77
3.6.2. Оценки гидрологического режима по модельным данным соотношения	
стабильных изотопов кислорода	84
3.7. Выводы к главе 3	90
ГЛАВА 4. Тысячелетние изменения климата и окружающей среды на	
востоке Таймыра	91
4.1. Длительные хронологии по содержанию стабильных изотопов углерода и	
кислорода в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина	91
4.1.1. δ^{13} С в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина с 516 г. по 2009 г.	
Н.Э	91
4.1.2. δ ¹⁸ О в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина с 516 г. н.э. по	
2009 г. н.э	92
4.2. Климатические факторы, оказывающие влияние на изменение соотношения	
стабильных изотопов углерода и кислорода	93
4.3. Реконструкция осадков июля по соотношению стабильных изотопов	
углерода в целлюлозе годичных колец	93

4.4. Реконструкция климатического индекса арктической циркуляции мая по	
данным δ^{18} O в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина для восточной	
части полуострова Таймыр	95
4.5. Выводы к главе 4	97
ГЛАВА 5. Изменения климата и окружающей среды в Алтае-Саянской	
Горной стране	98
5.1. Длительные хронологии по содержанию углерода и кислорода в целлюлозе	
годичных колец лиственницы сибирской	98
5.1.1. δ ¹³ С в целлюлозе годичных колец лиственниц с 520 г. н.э. по 2016 г. н.э	98
5.1.2. δ ¹⁸ О в целлюлозе годичных колец лиственниц с 520 г. н.э. по 2016 г. н.э	99
5.2. Климатические факторы, оказывающие влияние на изменение соотношения	
стабильных изотопов кислорода и углерода	100
5.3. Климатические реконструкции по δ^{13} С и δ^{18} О в целлюлозе годичных колец	100
5.3.1. Реконструкция осадков июля	100
5.3.2. Реконструкция дефицита упругости водяного пара в июне	102
5.3.3. Реконструкция температуры воздуха июля	103
5.3.4. Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния в	
июле	104
5.4. Выводы к главе 5	105
ГЛАВА 6. Эффективность использования воды хвойными в течение	
последнего тысячелетия	106
6.1. Трансект в высоких широтах	108
6.2. Сибирский трансект	112
6.3. Высокогорные районы (градиентный подход)	113
6.4. Эффективность использования воды деревьями в XX веке: оценка на	
основе измеренных и модельных данных	116
6.5. Выводы к главе 6	124
ГЛАВА 7. Изменение климата и условий окружающей среды в	
высокоширотных районах севера Евразии	125
7.1. Источники палеоклиматической информации из субарктики Евразии	125

7.1.1. Многопараметрический подход для сопоставления палеоклиматической	
информации по данным разных косвенных источников	126
7.2. Изменения климата на востоке Таймыра	127
7.2.1. Современный период	127
7.2.2. Средневековый период потепления	128
7.2.3. Климатический оптимум	129
7.3. Многопараметрический подход для сопоставления палеоклиматической	
информации по данным разных косвенных источников	132
7.4. Общий палеоклиматический сигнал в хвойных для высокоширотных	
районов Евразии	141
7.4.1. Влияние летней температуры воздуха на рост хвойных	142
7.4.2. Влияние облачных и солнечных периодов на рост хвойных	143
7.4.3. Индикация изменчивости осадков и индексов северо-атлантических	146
(NAO) и арктических (AO) циркуляционных масс по данным стабильных	
ИЗОТОПОВ	
7.5. Выводы к главе 7	148
ГЛАВА 8. Многопараметрический подход к изучению изменения климата	
и условий окружающей среды на Алтае по данным стабильных изотопов в	
целлюлозе годичных колец, ледниковых кернов и озерных	
отложений	150
8.1. Многопараметрический подход	150
8.1.1. Изменчивость радиального прироста древесных растений	154
8.1.2. Соотношение ¹⁸ O/ ¹⁶ O в целлюлозе годичных колец деревьев и в	
ледниковом керне Белуха	155
8.1.3. Сравнительный анализ климатических реконструкций по данным	
содержания стабильных изотопов в годичных кольцах деревьев и донных	
отложений оз. Телецкое	159
8.2. Ограничения многопараметрического подхода	162
8.3. Выводы к главе 8	163

ГЛАВА 9. Экофизиологический отклик хвойных из высокоширотных и	
высокогорных районов Евразии на мощные стратосферные извержения	
вулканов	164
9.1. Аномалии, зафиксированные параметрами годичных колец деревьев и	
стабильными изотопами после стратосферных вулканических	
извержений	168
9.1.1. Климатические аномалии после стратосферных извержений 535 г. и 540	
Г. Н.Э	170
9.1.2. Климатические аномалии после стратосферного извержения вулкана	
Самалос 1257 г. н. э	178
9.1.3. Климатические аномалии после стратосферного извержения вулкана	
Паркер 1640 г. н. э	178
9.1.4. Климатические аномалии после стратосферного извержения вулкана	
Тамбора 1815 г. н. э	179
9.1.5. Климатические аномалии после стратосферного извержения вулкана	
Пинатубо 1991 г. н. э	180
9.2. Климатические функции отклика между метеорологическими данными и	
параметрами годичного кольца	183
9.2.1. Влияние температуры воздуха на рост хвойных после стратосферных	
извержений вулканов	184
9.2.2. Влияние атмосферных осадков и дефицита упругости водяного пара на	
рост хвойных после стратосферных извержений вулканов	186
9.2.3. Влияние продолжительности солнечного сияния на рост деревьев после	
стратосферных извержений вулканов	187
9.3. Климатические аномалии, зафиксированные после стратосферных	
извержений вулканов по данным годичных колец, ледниковых кернов и споро-	
пыльцевых спектров	189
9.3.1. Температурные аномалии	189
9.3.2. Аномалии в гидрологическом режиме	193
9.3.3. Смещение фаз атмосферных циркуляционных масс	194

9.4. Выводы к главе 9	196
Заключение	197
Основные выводы	198
Список литературы	201
Приложение	233
Таблица 3. 1	233
Таблица 3. 2	240
Таблица 4. 1	246
Таблица 4. 2	253
Таблица 5. 1	261
Таблица 5. 2	269
Таблица 6. 1	275
Таблица 9. 1	279

Бореальные лесные экосистемы являются одним из самых больших биомов на Земле [Apps et al., 2006; Cable et al., 2013], представляя собой огромный экологический и экономический потенциал. Однако, в последние десятилетия данные лесные экосистемы значительно подвергаются антропогенному воздействию по сравнению с преиндустриальным периодом [Apps et al., 2006; Allen et al., 2010; Pachauri et al., 2014; Fischer et al. 2018].

Современное потепление, вызванное увеличением парниковых газов в атмосфере, ведет к деградации многолетней мерзлоты в высокоширотных и высокогорных районах Евразии [ACIA, 2004; Pachauri et al., 2014]. Известно, что многолетняя мерзлота играет важную роль в стабилизации климатических систем, воздействуя на глобальный цикл углерода [Schuur et al., 2015]. Деревья, произрастающие в северных лесных экосистемах в зоне многолетней мерзлоты очень чувствительны к климатическим изменениям вследствие малого количества атмосферных осадков (175 - 250 мм/год) [Абаимов, 1996; Ваганов и др. 1996; Сидорова, Наурзбаев, 2002; Sidorova et al., 2008-2012; Boike et al., 2013]. Ожидается, что при увеличении температуры воздуха дефицит упругости водяного пара будет расти не только в высокоширотных [Cable et al., 2013; Churakova (Sidorova) et al., 2016а], но и в высокогорных лесных экосистемах, что увеличит эвапотранспирацию, которая играет важную роль в водном балансе деревьев [Allen et al., 2010; Saurer et al., 2014; Frank et al., 2015; Churakova (Sidorova) et al., 2016]. Эти эффекты, как результат современных климатических изменений еще мало изучены, однако последствия таких изменений несомненно важны для понимания функционирования лесных экосистем в новых условиях.

В течение последних десятилетий большинство исследований о влиянии изменения температуры было проведено в бореальных и альпийских лесных экосистемах [Apps et al., 2006; Allen et al., 2010; Pachauri et al., 2014]. Однако, до сих пор очень мало известно о роли влияния атмосферных осадков и изменения влажности на стратегию выживания древесных видов и адаптацию лесных экосистем в высокоширотных и высокогорных районах Евразии в течение современных и прогнозируемых изменений климата. Баланс между атмосферными осадками и эвапотранспирацией в данных лесных экосистемах может быть серьезно нарушен увеличением температуры и изменением режима осадков и атмосферных циркуляций [ACIA 2004; CH 2011]. Увеличение температуры в будущем предполагает рост водного дефицита, что значительно уменьшает продуктивность и накопление углерода. Применение экофизиологических и процессных моделей может помочь выявить пределы устойчивости и адаптивные возможности лесных экосистем при возрастании засушливых условий окружающей среды.

Получить информацию об изменении водного баланса в системе атмосфера-растениепочва, в том числе, об источнике воды, используемой деревьями в процессе роста и развития, влажности почвы, атмосферных осадках, относительной влажности воздуха возможно при помощи исследования соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода, содержащихся в годичных кольцах [Farquhar, 1989; Roden, 2000; McCarroll et al., 2004; Siegwolf, Saurer, 2007; Sidorova et al., 2008; Gagen et al., 2010]. Такую информацию невозможно получить только из измерений ширины годичных колец деревьев, произрастающих в высокоширотных и высокогорных районах Евразии [Sidorova et al., 2010]. Таким образом, изучение отклика древесных растений в бореальных и альпийских лесах на климатические изменения в прошлом по содержанию стабильных изотопов углерода и кислорода позволяет выявить (реконструировать) уровень прошлых и современных климатических изменений, и прогнозировать изменения в будущем. Согласно отчету Межправительственной комиссии по климатическим изменениям [IPCC, 2014], некоторые аспекты текущего потепления не являются аномальными (температура воздуха), а некоторые, такие как увеличение углекислоты, являются аномальными в течение позднего Голоцена. Для выявления экстремально (аномально) теплых, холодных, влажных и засушливых периодов необходимо знать историю в прошлом. Применение длительных кислорода хронологий ПО содержанию углерода И В годичных кольцах В палеоклиматических исследованиях является необходимым для оценки климатических изменений в прошлом и оценки современных климатических изменений.

10

<u>Актуальность</u>

Классический дендрохронологический анализ, объединенный с анализом стабильных изотопов, открывает принципиально новые подходы к исследованию отклика древесных растений, произрастающих на многолетнемерзлотных почвах в высокоширотных и высокогорных районах Евразии, которые позволяют выявить экофизиологические механизмы взаимодействия между лесными экосистемами и окружающей средой в прошлом и оценить их роль в условиях глобального и регионального изменений климата.

Цель исследования

Выявить экофизиологический отклик хвойных деревьев, произрастающих в высокоширотных и высокогорных районах Евразии на изменения климата и условий среды в позднем Голоцене на основе анализа стабильных изотопов углерода (δ^{13} C) и кислорода (δ^{18} O) в целлюлозе годичных колец.

Задачи исследования

- Верификация статистических связей между климатическими параметрами и δ¹³C, δ¹⁸O в целлюлозе годичных колец лиственниц для высокоширотных (Таймыр, Якутия) и высокогорных (Алтай) районов в течение современного периода.
- Построение климатических реконструкций по содержанию δ¹³C, δ¹⁸O в целлюлозе годичных колец лиственниц для северо-востока Якутии, востока Таймыра и высокогорного Алтая за последнее тысячелетие с целью выявления прошлых климатических изменений и условий окружающей среды.
- Применение экофизиологических и процессных моделей для интерпретации погодичной изменчивости δ¹³C, δ¹⁸O в годичных кольцах лиственниц.
- 4. Выявление эффективности использования воды древесными растениями в течение последнего тысячелетия.

- Проведение сравнительного анализа погодичной изменчивости δ¹³C, δ¹⁸O вдоль районов высоких широт и высокогорного градиента, с привлечением других косвенных источников информации об изменении климата.
- 6. Анализ взаимосвязей параметров структуры годичных колец деревьев, произрастающих на северо-востоке Якутии, востоке Таймыра, и горном Алтае для экстремальных периодов, характеризующихся влиянием стратосферных вулканических извержений в течение последнего тысячелетия.

Научная новизна

Данная работа является мульти-дисциплинарной, объединяющая три основных направления:

- Палеоклиматология регрессионный анализ между климатическими факторами, такими как: температура воздуха, атмосферные осадки, дефицит упругости водяного пара, суммарная продолжительность солнечного сияния и арктические (AO) колебания и соотношением стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец хвойных для современного периода, и их реконструкций в течение позднего Голоцена. Исследование воздействия мощных вулканических извержений на вариацию стабильных изотопов в целлюлозе деревьев лиственницы до и после исторических событий.
- 2) Физиология и экология древесных растений исследование экофизиологического отклика деревьев на изменения условий окружающей среды в течение современного и прошлых периодов, основанных на объединенной модели фракционирования стабильных изотопов углерода и кислорода. Использование анализа ширины годичных колец деревьев, изотопов углерода, кислорода и экофизиологической модели с выявлением реакции древесных растений на процесс фотосинтеза и эффективности использовании воды в течение исследуемых периодов для трех районов исследования.
- 3) **Верификация экофизиологических и процессных моделей** впервые полученные хронологии по соотношению стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе

годичных колец хвойных использованы для калибровки и верификации экофизиологических и процессных моделей.

Комбинация классических методов дендрохронологии с анализом стабильных изотопов позволяет выявить изменения климата и условий окружающей среды в высокоширотных и высокогорных районах Евразии. В частности, сигнал, зафиксированный, в изотопных данных годичных колец помогает выявить новые аспекты влияния многолетней мерзлоты и осадков на особенности роста и адаптации древесных растений, а также позволяет применить данные для оценки будущих изменений.

Защищаемые положения

- 1. Анализ соотношения ¹³C/¹²C в целлюлозе годичных колец лиственниц из высокопиротных и высокогорных районов Евразии дает новую информацию о воздействии атмосферных осадков, дефицита упругости водяного пара на рост деревьев, которую невозможно выявить по данным изменчивости ширины годичных колец.
- Длительные изменения температуры воздуха, суммарной продолжительности солнечного сияния, индексов арктических (АО) колебаний реконструируются по соотношению стабильных изотопов ¹⁸O/¹⁶O.
- 3. Сопряженный анализ погодичной изменчивости ¹³C/¹²C и ¹⁸O/¹⁶O и экофизиологического моделирования позволяет выявить увеличение глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлотных почв и адаптацию корневой системы древесных растений в результате потепления в высокоширотных районах Евразии. Эффективность использования воды (iWUE) указывает на значимое увеличение концентрации CO₂ в высокоширотных районах по сравнению с высокогорными.
- Климатические реконструкции по разным палеоклиматическим источникам свидетельствуют, что на севере Евразии современный период является более теплым и сухим по сравнению со средневековым потеплением.

5. Сильные стратосферные извержения вулканов за последние 500 лет различно фиксируются деревьями высокоширотных и высокогорных районов Евразии. Наиболее однородный отклик по параметрам структуры годичных колец и по соотношению стабильных изотопов наблюдается в VI - XIII веках прошлого тысячелетия.

Применение данной работы и практическая значимость

Результаты работы войдут в отчет Межправительственной комиссии по изменению климата и адаптации лесных экосистем к современным изменениям окружающей среды, которая поможет политикам принять решение об изменении технологических проектов, ведущих к уменьшению содержания СО₂ в атмосфере.

Длительные хронологии по содержанию δ^{13} С и δ^{18} О в целлюлозе годичных колец хвойных из высокоширотных и высокогорных районов Евразии будут опубликованы во всемирной базе данных по стабильным изотопам «PAGES Iso2K» – «Прошлые климатические изменения». Автор является членом данной программы и возглавляет группу по созданию глобальной базы данных и интерпретации результатов по содержанию стабильных изотопов кислорода в целлюлозе годичных колец деревьев по всему миру http://www.pastglobalchanges.org/ini/wg/2k-network/projects/iso2k.

<u>Апробация работы</u>

Основные положения работы докладывались более чем на 20 Международных: GASIR 2011, Swiss Global Change Day 2005-2011, Швейцария; GASIR 2012, Германия; ISOECOL 2012, Франция; SIBAE-ISO 2003, Millennium 2008, Испания; Holivr 2006, Великобритания; 7th dendrochronological conference 2006, Китай; SIBAE-ISO 2006, Португалия; IUFRO 2003, Австралия; EGU 2009-2018, Австрия и Всероссийских конференциях: Красноряск 2003-2005, Москва 2003, Иркутск 2000, 2007.

По результатам данной работы разработаны курсы лекций и практических занятий на русском и английском языках для бакалавров и магистров Сибирского Федерального Университета (СФУ, Российская Федерация), и немецком языке для студентов Федерального Технического Института Цюриха и Университета Базеля, Швейцария.

В период с 2005 по 2017 гг. автором самостоятельно измерены, построены, и проанализированы длительные хронологии по содержанию стабильных изотопов кислорода

и углерода в целлюлозе годичных колец лиственниц для северо-востока Якутии, востока Таймыра и горного Алтая. Измерения стабильных изотопов для всех районов исследования были проведены в Институте Пауля Шеррера, Швейцария и Хемгольц центре по исследованию окружающей среды, UFZ Хаале/Заале, Германия при поддержке персональных и коллективных грантов. Определение цели, задач, выбор объекта исследований, статистическая обработка временных серий и интерпретация полученных результатов выполнена автором самостоятельно.

<u>Публикации</u>

По материалам диссертации опубликовано 37 научных работ в рецензируемых Российских и Международных журналах, главах монографий, материалах конференций, из них 25 научных работ опубликовано первым автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, выводов, списка литературы, и приложения. Список литературы включает 283 названия, из них 254 - зарубежные источники. Общий объем работы составляет 285 страниц включая приложение, 67 рисунков, 6 фотографий и 17 таблиц.

<u>Благодарности</u>

Исследования были проведены в рамках программ: Европейского Сообщества (персональные гранты № 1839, № 596) 2005-2007 гг.; Мария-Кюри EU_ISOTREC 235122, 909122, 2010-2013 гг.; Немецкого Сообщества Гельмгольц Центра (UFZ Хаале/Заале) - 2006 г.; Швейцарского Национального Фонда (SNSF): 200021_121838/1 – 2006 г., SNF IZRPZ0_164735 2016-2017 гг.; SNF SCOPES (IB 74AO.110950, IB73AO.111134); Российской Научной Школы 5327.2012.4; РФФИ г сибирь а, № 09-04-00803-а, № 08-06-002.

Автор выражает искреннюю благодарность научному консультанту, академику РАН Ваганову Е. А. за ценные советы и поддержку. Особая признательность д.б.н. Беньковой В. Е. и к.ф-м.н. Шашкину А. В. за поддержку, научные советы и совместные исследования на ранних этапах написания диссертации. Отдельная признательность Dr. Siegwolf R. T. W., Dr.

Saurer M. за научную и финансовую поддержку в измерении стабильных изотопов углерода и кислорода в Институте Пауля Шеррера, Швейцария, Dr. T. Boettger из Хемгольц центра по исследованию окружающей среды, Хаале/Заале.

Автор признателен за совместные исследования с использованием данных по климатическим реконструкциям озерных отложений оз. Телецкое И. А. Калугину и А. В. Дарьину, а также ледниковых кернов ледника Белуха профессору Schwikowski M., Институт Пауля Шеррера, Швейцария. Используемые в работе данные по анатомической структуре годичных колец лиственниц для исследованных районах выполнены в совместных исследованиях с к. б. н. Брюхановой М. В., моделирование с к. б. н. Беньковой А. В., к. ф-м. н. Шашкиным А. В., Dr. Keller, проф. Joos F. Совместные исследования также были проведены в рамках коллективных проектов с к. б. н. Кнорре А. А., к.б.н. Кирдяновым А. А., д.и.н. Мыгланом В. С., д.т.н. Шишовым В. В., к.г.н. Овчинниковым Д. В., к.б.н. Беньковой А. В.

Использованные образцы древесины в данной работе собраны в ходе экспедиций 2000-2016 гг. д. и. н. В. С. Мыгланом на Алтае и в период с 1992 по 2004 гг. на востоке Таймыра и северо-востоке Якутии д. б. н. Наурзбаевым М. М.

ГЛАВА 1. Стабильные изотопы углерода и кислорода в годичных кольцах деревьев в палеоклиматологических и экофизиологических исследованиях

Анализ соотношения стабильных изотопов углерода (¹³C/¹²C) и кислорода (¹⁸O/¹⁶O) в годичных кольцах деревьев, а также их применение для палеоклиматологических реконструкций и экофизиологических исследований непрерывно растет, т.к. стабильные изотопы углерода и кислорода обеспечивают информацией с временным разрешением до одного года [McCarroll, Loader, 1994] и даже сезона [Vaganov et al., 2009] с высокой статистической достоверностью. Более того, стабильные изотопы позволяют выявить климатическую информацию, которая не содержится в других параметрах годичных колец деревьев, например, ширине годичных колец, максимальной плотности поздней древесины, и клеточной стенки [McCarroll, Loader, 1994; Saurer et al., 2002; McCarroll et al., 2003; Skomarkova et al., 2006; Gagen et al., 2006; Sidorova et al., 2008, 2010, 2013; Loader et al., 2013; Churakova (Sidorova) et al., 2016 a; Genaretti et al., 2017]. Также, стабильные изотопы кислорода широко используются для реконструкций прошлых климатических событий [Treydte et al., 2007; Edwards et al., 2008; Gagen et al., 2011] и для изучения современного гидрологического цикла [Edwards et al., 2008]. Пространственные распределения δ^{18} О за последнее столетие рассмотрены в нескольких работах [Saurer et al., 2002; Herweijer et al., 2007; Treydte et al., 2007]. Циклы изотопов воды, включающие перенос воды, успешно были применены к атмосферным циркуляциям и системному моделированию [Joussaume et al., 1987; Jouzel et al., 1987; Werner et al., 2005] для характеристики гидрологического цикла.

В Сибири, годовая изменчивость зимних осадков, содержащихся в δ^{18} О значимо связана с температурой и арктическими, а также северо-атлантическими колебаниями [Sidorova et al., 2010], которые изменяются в течение летних месяцев и доминируют на региональном уровне, как процесс вовлечения транспирации и переноса атмосферных масс [Sidorova et al., 2010; Butzin et al., 2014].

Комбинация классических методов дендрохронологии с анализом стабильных изотопов углерода и кислорода позволит выявить точную информацию об изменении климата и условий окружающей среды. А именно, поможет получить более полные и качественные реконструкции климата, более реалистичные прогнозы на будущее. Понять важность климатических изменений и оценить уровень увеличения углекислоты в атмосфере

и их воздействие на лесные экосистемы необходимы для улучшения компьютерных моделей и предсказания будущих климатических изменений.

В северной Европе, хронологии, полученные по ширине годичных колец продлены до 7000 лет [Eronen et al., 1999; Grudd et al., 2002], а также получены тысячелетние хронологии по содержанию стабильных изотопов углерода в годичных кольцах сосны для Швеции [Loader et al., 2013], Hopberuu [Young et al., 2012], Финляндии [Gagen et al., 2008, 2010, 2013) и Кольского полуострова по данным Татьяны Бетгер (UFZ, Германия) [Kremenski et al., 2004]. Для районов Канады, уже получены тысячелетние хронологии по стабильным изотопам углерода и кислорода [Naulier et al., 2015; Gennaretti et al., 2017]. Районы Швейцарских Альп представлены длительными тысячелетними хронологиями по углероду и кислороду, содержащимися в целлюлозе годичных колец лиственниц, указывающие на увеличение числа засушливых событий в течение современного периода по сравнению со средневековым периодом [Kress et al., 2014]. Керстин Трейдте с соавторами [Treydte et al., 2007] представили длительную хронологию по содержанию δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец можжевельника из северного Пакистана, которая позволила выявить увеличение влажности в данном районе исследования в течение последнего тысячелетия.

Влияние северных атлантических колебаний на изменение соотношения углерода и кислорода в целлюлозе Тяньшаньской ели (*Picea schrenkiana*) были представлены Ху с соавторами [Xu et al., 2015].

Длительные хронологии по ширине и максимальной плотности поздней древисины годичных колец, полученные для высокоширотных районов субарктики Евразии [Sidorova, Naurzbaev, 2002; Naurzbaev et al., 2002], и высокогорных районов Алтая [Мыглан и др., 2009; Büntgen et al., 2016] необходимы в дальнейшем исследовании, в частности для анализа стабильных изотопов. Данный пробел будет заполнен в представленной диссертационной работе.

1. 1. Стабильные изотопы углерода в годичных кольцах деревьев

Растения имеют различные фотосинтетические пути для фиксации углерода, которые различаются фотосинтетическими продуктами. Так деревья, которые в большинстве случаев

используются для дендрохронологических и дендроклиматических исследований относятся к группе C3 растений, где первый фотосинтетический продукт содержит три атома углерода [Ehleringer, Vogel, 1993].

На рост деревьев влияет солнечная радиация, температура воздуха, относительная влажность, наличие гидрологического и минерального питания (Рисунок 1. 1).



Рисунок 1. 1. Схематическая диаграмма изотопного фракционирования между климатическими переменными и процессами внутри листа модифицированная после Маккэрол и Лоадер [McCarroll, Loader 2000].

Соотношение ${}^{13}C/{}^{12}C$ в атмосфере около -8‰ (VPDB, виртуальный стандарт определен как $\delta^{13}C$ 19 + 1,95‰). Листья / хвоя и древесина деревьев содержат меньшее соотношение углерода (-15‰ - 35‰), демонстрируя, что деревья более обеднены ${}^{13}C$. Это изменение в отношение от источника к продукту называется изотопным фракционированием, когда степень фракционирования контролируется откликом деревьев к окружающей среде. Мембраны позволяют проводить молекулы воды (H₂O) в результате газообмена. Соотношение стабильного изотопа углерода в годичных кольцах отражает

изменения в балансе между устьичной проводимостью и скоростью изменения фотосинтеза. Растения реагируют на ограничение водных ресурсов уменьшением устьичной проводимости. В частности, при низком количестве осадков и относительно теплых и сухих уменьшение условях произрастания происходит концентрации углекислоты BO внутриклеточном пространстве. Это приводит к уменьшению дискриминации углерода и как результат к менее негативному содержанию δ^{13} С [Farquhar et al., 1989] и увеличению δ^{18} О [Farquhar, Lloyd, 1993; Cernusak 2013].

Фракционирование происходит тогда, когда содержание CO₂ внутри листа (c_i) утилизируется фотосинтетическими энзимами. Биологические процессы ведут к использованию ¹²C и отдают предпочтение ¹³C, тем самым проходит фракционирование вследствие карбоксилирования, которое оценивается примерным значением \approx -27‰. Таким образом, дискриминация относительно ¹³C в течение фиксации углерода может быть выражена:

$$\delta^{13}C \text{ pact} = \delta^{13}C \text{ atm} - a - (b-a) \cdot c_i/c_a$$
 (1.1),

где а – дискриминация относительно ¹³CO₂ в течение распространения (диффузии) через устьицу (\approx - 4.4‰), b – дискриминация в результате карбоксилирования (\approx - 27‰), c_i – внутренняя и c_a – внешняя концентрация CO₂ [Farquhar et al., 1982].

Фракционирование, протекающее в результате диффузии и карбоксилиования является постоянным. В деревьях, значения сахаров в листе / хвое контролируется отношением внутреннего (c_i) к внешнему (c_a) содержанию CO₂. Если $c_i > c_a$, тогда устьичная проводимость намного выше, чем скорость фотосинтеза и тем сильнее выражена дискриминация карбоксилирования относительно ¹³C, тем самым, указывая на низкие значения δ^{13} C. Если уровень устьичной проводимости является низким по сравнению со скоростью фотосинтеза, тогда CO₂ внутри листа будет падать и как следствие реакция карбоксилирования будет уменьшаться при дискриминации относительно ¹³C, приводящее к более высоким значениям δ^{13} C. В течение засушливых условий, устьицы частично закрываются, для сохранения воды, и, наоборот, при влажных условиях открываются. Таким

образом, δ^{13} С является индикатором об изменении наличия воды и относительной влажности. Доминирующим контролем соотношения стабильных изотопов в годичных кольцах деревьев является контроль уровня устьичной проводимости и скорости фотосинтеза.

1. 2. Стабильные изотопы кислорода в годичных кольцах деревьев

Содержание стабильных изотопов кислорода (¹⁸O/¹⁶O) в годичных кольцах деревьев отражают изотопный сигнал в осадках [Craig, 1961; Daansgard, 1964; Saurer, Siegwolf, 2007], который представлен как источник воды. Источник воды поступает от грунтовой и талой воды через корни в ствол деревьев и затем в листья/хвою (Рисунок 1. 2). Степень открытия и закрытия устьиц модифицирует содержание кислорода в воде листа. Легкие изотопы кислорода (¹⁶O) испаряются легче по сравнению с тяжелыми (¹⁸O). Таким образом, хвоя насыщается $H_2^{18}O$. Насыщение (обогащение) содержанием $\delta^{18}O$ происходит под воздействием транспирации в листе или хвое, которая может быть усилена под воздействием засушливых условий [Yakir, Sternberg, 2000]. Вода содержит температурный сигнал и годичные кольца деревьев модифицируют данный сигнал (сигнал об осадках и температуре).



Рисунок 1. 2. Модифицированная версия схематической диаграммы изотопного фракционирования между осадками и хвоей [Craig, 1961; McCarroll et al., 2004].

Изотопная комбинация δ^{18} O – источника воды, используемая корнями деревьев, дополнительно определяется эвапотранспирацией в листе/хвое и содержит информацию о наличии влаги. Атмосферная вода, содержащая сигнал об изменение δ¹⁸О напрямую зависит от влажности/температуры воздуха [Dansgaard, 1964] так же как эвапотранспирация и процессы конденсации в глобальных гидрологических циклах. Вода, как входной параметр модифицирована степенью насыщения ¹⁸О в хвое, в следствии транспирации, которая формирование через включена фотосинтез целлюлозы биохимическое В И фракционирование и процессы обмена. В уравнении (1. 2) е_к- кинетическое фракционирование (необратимая реакция) в большинстве случаев происходит когда субстрат трансформируется в другой продукт [Craig, Gordon, 1965; Dongmann et al., 1974].

$$\delta^{18}O = \delta^{18}O_{uctownuk} + e_k + e_e + (\delta^{18}O_{ucnapenue} - \delta^{18}O_{uctownuk} - e_k) \bullet e_a/e_i \qquad (1.2)$$

Фракционирование является обратным к тяжелым стабильным изотопам (СО2 поглощённый Рибулозо-1,5-бисфосфат (рибулозо-1,5-дифосфат, Py6Φ) И трансформированным в 3-Фосфоглицериновую кислоту (3-ФГК, 3-фосфоглицерат). Такой процесс часто катализируется ферментами, где продукт является необратимым и разделяется воздействием трансформации к различным продуктам. Термодинамическое под фракционирование (равновесие) описывается параметром - е. Субстрат изменяется к продукту, когда может возвращаться в начальную форму субстрата, соответственно процесс достигает равновесия. Диффузионное фракционирование подобно равновесному, за исключением процессов, фотосинтеза, когда CO₂ распространяется от воздуха из окружающей среды к устьичному пространству, снижая вариацию интенсивности [Craig, Gordon, 1965; Dongmann et al., 1974].

Раюота Барбор с соавторами [Barbour et al., 2001] показала, что δ^{18} О негативно коррелирует с устьичной проводимостью, потому что изменение скорости транспирации влияет на пополнение запасов воды в листе/хвое с необогащенной водой в почве. Смешанный сигнал δ^{18} О, как источника насыщения водой листвы-хвои очень часто увеличивает климатический сигнал содержания δ^{18} О в осадках и аккумулируется в древесине и целлюлозе годичных колец [Saurer et al., 1997; Roden et al., 2000]. В течение

биохимической транспирации изотопы кислорода испытывают следующие важные модификации: 1) примерно на 27-28‰ происходит смещение в целлюлозе [Stenberg, DeNiro, 1996]; 2) амплитуда сигнала сглаживается (эффект затухания) [Saurer et al., 1997] при обмене δ¹⁸О источника воды и воды в ксилемме в течение синтеза целлюлозы. По данным вариаций соотношения стабильных изотопов кислорода представляется возможным выявить информацию об изменении окружающей среды как отклика изменения температуры, СО₂ и влажности. Так, устьичная проводимость уменьшается с увеличением концентрации CO₂ в атмосфере. Информация, об испаряемости, содержащаяся в органическом веществе является полезной для разделения сигнала об изменении внутриклеточного CO₂ (*c_i*), рассчитанного с использованием δ^{13} C, вследствие изменения устьичной проводимости или скорости фотосинтеза [Scheidegger et al., 2000]. Целлюлоза годичных колец формируется из сахаров, переносимых от листа к стволам деревьев, где идет обмен с ксилеммой и источником воды. В результате обмена кислорода целлюлоза годичных колец напрямую фиксирует изотопное соотношение источника воды. Если нет обмена, изотопное соотношение отражает как источник воды, так и степень насыщения из-за эвапотранспирации в хвое. Очевидно, в таком случае палеоклиматический сигнал будет проинтерпретирован как пропорция обмена атомов кислорода H₂¹⁸O из почвы к целлюлозе годичных колец [Roden et al., 2000]. Для формирования целлюлозы, сахароза расщепляется на гексозу и фосфат, позволяя 20% кислорода обмениваться с молекулами воды.

Экофизиологическая модель Родена [Roden et al., 2000] рассматривает изотопный обмен воды между целлюлозой и ксилеммой. Изотопная композиция воды в хвое может быть теоретически оценена используя модель Крейг-Гордона [Craig, Gordon, 1965]. Максимальная насыщаемость относительно модели Крейг-Гордона [Craig, Gordon, 1965] достигается эвапотранспирацией. Вода в хвое является менее насыщенной чем теоретические значения, потому что вода в ксилемме движется к листу/хвое посредством процесса транспирации, которая модифицируется диффузионными процессами насыщенной воды от поверхности эвапотранспирации описанной эффектом Пеклета [Farquhar, Lloyd, 1993]. Таким образом, δ^{18} О в годичных кольцах отражает температурный сигнал и сигнал о гидрологических изменениях. Предпологается, что температурный сигнал значимо зависим от приходящей солнечной радиации [Loader et al. 2013], и как следствие может быть проинтепретирован как

дополнительных косвенный источник, отражающий сигнал в целлюлозе годичных колец деревьев.

1. 3. Стабильные изотопы углерода и кислорода, как двойной подход к интерпретации экофизиологического и климатического сигналов

Комбинационный подход к исследованию стабильных изотопов углерода и кислорода является мощным инструментом для понимания функционального отклика к изменению окружающей среды в течение времени. Данный подход, основан на связях между газообменом внутри листа и фракционированием изотопов для выявления серий сценариев, которые могут быть использованы для выявления изменений в фотосинтетических ассимиляциях и устьичной проводимости к изменению факторов окружающей среды, таких как свет, СО₂, наличие воды, относительная влажность воздуха, температура и минеральные вещества. Стабильные изотопы углерода и кислорода, измеренные в годичных кольцах, являются важным источником информации для выявления отклика деревьев на изменения климата, окружающей среды и концентрации углекислоты в атмосфере. Так как, деревья аккумулируют углекислоту, изменение композиционного состава атмосферы будет отражаться на содержании стабильного углерода в годичном кольце. Однако, концентрация СО₂ может так же оказывать влияние на скорость фотосинтеза и дискриминацию изотопов.

Для палеоклиматических реконструкций данный подход особенно важен, так как позволяет выявить отклик древесных растений не только на выявление термических, но также эко-гидрологических изменений. Анализ экофизиологических особенностей деревьев используя стабильные изотопы углерода и кислорода особенно ценны в комбинировании с моделью фотосинтеза для рассмотрения влияния метеорологических условий на функцию растений, таких как устьичная проводимость и изменение внутриклеточной (c_i) и внешней (c_a) концентрации CO₂ (c_i/c_a) [Farquhar et al., 1982; Arneth et al., 2002; Vaganov et al., 2006].

4. Применение экофизиологических и процессных моделей для интерпретации δ¹³C и δ¹⁸O
в годичных кольцах хвойных

В настоящее время, число экофизиологических исследований в районах покрытых многолетней мерзлотой увеличивается [Boike et al., 2013; Bryukhanova et al., 2015; Saurer et al., 2015; Прокушуин и др., на рецензии]. Однако, применение параметров годичных колец деревьев (ширины годичного кольца, δ¹³C и δ¹⁸O) полученных для деревьев, произрастающих в зоне мерзлоты в экофизиологических моделях остаются слабо изученными [Бенькова, Шашкин, 2003; Churakova (Sidorova) et al., 2016b].

Процессные модели, которые определяют физические и биохимические процессы фракционирования, ведущие к изотопной вариации кислорода в органическом веществе, используются для идентификации источника воды для деревьев. Разработка и использование таких моделей особенно важны для исследования влияния климатических факторов в Сибирских лесных экосистемах. В частности, выявление физиологических механизмов реакции лиственницы на изменения гидрологических условий окружающей среды в течение современного периода и выявление источника доступа и использования воды.

ГЛАВА 2. Материалы и методы исследования

2. 1. Объекты и районы исследования

Объектами исследования являлись образцы живых и отмерших (историческая, полуископаемая древесина) деревьев лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr), Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr) и Сибирской (*Larix sibirica* Ldb).

Районами исследования являлись: высокоширотные – северо-восток Якутии [69° с.ш. и 149° в.д.], восточная часть полуострова Таймыр [68° с.ш. и 103° в.д.], а также высокогорный район Алтая, Монгун-тайга [49-50° с.ш. и 86-87° в.д.] (Рисунок 2. 1).



Рисунок 2. 1. Схематическая карта районов исследования и фотографии деревьев лиственниц: *Larix cajanderi* Mayr., произрастающих на северо-востоке Якутии (синий круг), *Larix gmelinii* Rupr. Востоке Таймыра (черный круг); *Larix sibirica* Ldb. Монгун тайге в Алтае-Саянской Горной Стране (красный круг). Фотографии сделаны М. М. Наурзбаевым и В. С. Мыглан. С целью выявления общего климатического сигнала в высокоширотных и высокогорных районах Евразии были использованы ранее опубликованные палеоклиматические источники информации: ледниковые керны, донные отложения и

споро-пыльцевые спектры. Месторасположение ледниковых кернов обозначены звездами голубого цвета для Гренландии (GISP2) [Meiert, Stuiver, 1999], Академии Наук, Северная Земля [Opel et al., 2013], и ледника Белуха [Henderson et al., 2006; Eichler et al., 2009]. Квадратом голубого цвета представлены данные, полученные по колебаниям Восточно - Сибирского моря [Calafat et al., 2013]. Звездой черного цвета отмечено местоположение оз. Телецкое (Алтай) [Kalugin et al., 2007; Калугин и др., 2009], данные по споро-пыльцевым спектрам оз. Лама (Полуостров Таймыр) [Andreev et al., 2002, 2004] представлены на карте зелеными звездами, чьи реконструкции по среднегодовому количеству осадков и температуре воздуха были использованы в данной работе для сравнительного анализа. Тысячелетние хронологии по содержанию δ^{13} С и δ^{18} О в целлюлозе годичных колец деревьев (красные звезды) [Kremenski et al., 2004; Gagen et al., 2012; Loader et al., 2013; Kress et al., 2014; Young 2015; Naulier et al., 2015; Gennaretti et al., 2017; Churakova (Sidorova) et al., 2016b], использованные для сравнительного анализа новых хронологий по северо-востоку Якутии, Таймыра и Алтая.

Для сопоставления высокоширотных тысячелетних реконструкций, полученных по основным районам исследования, описанным в данной главе 2.1. были рассмотрены данные по содержанию углерода и кислорода, и полученные по ним реконструкции для Швеции [Loader et al., 2013], Финляндии [Gagen et al., 2012], Норвегии [Young et al., 2012], Кольского полуострова по данным Татьяны Бетгер (UFZ, Германия) и Канады [Naulier et al., 2015; Gennaretti et al., 2017]. Так же для сравнительного анализа с целью выявления общих климатических колебаний для высокогорных районов исследований были рассмотрены ранее опубликованные хронологии для Швейцарских Альп, Летченталь [Kress et al., 2014] и Швейцарского Национального Парка [Churakova (Sidorova) et al., 2016b], а также данные по кислороду, полученные по образцам тысячелетних реконструкций по температуре, осадкам, полученным по данным хронологий стабильных изотопов углерода (δ^{13} С) и кислорода (δ^{18} О) были сопоставлены с другими косвенными климатическими источниками, такими как ледниковые керны Гренландии (GISP2) [Meiert, Stuiver, 1999], Академии Наук, Северная Земля [Opel et al., 2013], ледника Белуха [Henderson et al., 2006; Eichler et al., 2009],

колебаний уровня Восточно-Сибирского моря [Calafat et al., 2013] и реконструкциями по температуре воздуха и осадкам, полученным по данным озерных отложений Телецкое (Алтай) [Калугин и др., 2007], споро-пыльцевым спектрам оз. Лама [Andreev et al., 2004] (Таблица 2. 1). Для адекватной интерпретации прошлых климатических изменений необходимо так же понимание экофизиологических изменений в течение современного периода. В частности, изменения источника воды, отклика деревьев на изменения термического и гидрологического режимов. Для данных исследований были изучены районы северо-востока Якутии [Sidorova et al., 2008], востока Таймыра [Sidorova et al., 2010], Туры [Sidorova et al., 2009], Хакасии [Knorre et al., 2010], Коксу, Акташ и Монгун [Sidorova et al., 2012; 2013] (Таблица 2. 1).

Архив	Название		Временной интервал			Виды		Реконструкция			
палеоклима тической информации	района	Координаты	δ ¹³ C	δ ¹⁸ Ο	Другие параметры		Температура	Осадки	Продолжи- тельность солнечного сияния	Др. параметры	Литература:
	Торнетраск Швеция	68° с.ш. 19° в.д.	900- 2008	900- 2008		Pinus sylvestris L.			Июнь- август (б ¹³ С)		Loader et al., 2013
	Лаанила Финляндия	65° с.ш. 25° в.д.	800- 2002			Pinus sylvestris L.			Июнь- август (б ¹³ С)		Gagen et al., 2012
	Форфьерд, Норвегия	68° с.ш. 15° в.д.	990- 2001			Pinus sylvestris L.				Июль- август (δ ¹³ C)	Young et al., 2012
Целлюлоза годичных колец	Хибины Кольский Полуостров Россия	67° с.ш, 33° в.д.	1900- 2000	1900- 2005		Pinus sylvestris L.					Данные Татьяны Бетгер (UFZ) Kremenski et al., 2004
	Квибек тайга Канада Северная Америка	54° с.ш. 71° з.д.	997- 2006	997- 2006		Picea mariana Mill.	Июль-август (δ ¹³ C, δ ¹⁸ O)				Naulier et al., 2015 Gennaretti et al. 2017
	Летченталь Швейцария	46° с.ш. 7° в.д.	800- 2004	800- 2004		Larix decidua Mill.		Июль- август засуха (δ^{13} C)			Kress et al., 2014
	Швейцарский Национальный Парк	46° с.ш. 10° в.д.	1900- 2013	1900- 2013		Larix decidua Mill.					Churakova (Sidorova) et al., 2016a
	Каракорум Моор Пакистан	36° с.ш. 74° в.д.	828- 1998	1000- 1998		Juneperus turkistanica	Июнь- июль	Средне годовая (б ¹³ С)			Treydte et al., 2007, 2009

Таблица 2. 1. Косвенные источники палеоклиматической информации.

	Тура, Россия	64° с.ш., 100 ° в.д.	1864- 2006	1864- 2006		Larix gmelinii Rupr					Sidorova et al., 2009
	Хакасия	54° с.ш., 89° в.д.	1850- 2005	1850- 2005		Larix sibirica					Knorre et al., 2010
	Индигирка Якутия Россия	69° с.ш. 149° в.д.	516- 2004	516- 2004		<i>Larix</i> cajanderi Mayr	Июль (δ ¹³ C)		Июль (δ ¹⁸ O)	Июль VPD (δ ¹³ C)	Данная работа Churakova (Sidorova) et al., 2018
	Восточно- Сибирское море	70° с.ш. 162 ° в.д.			Уровень моря 1951- 1994						Calafat et al., 2013
	Хатанга Таймырский Полуостров Россия	68° с.ш. 103° в.д.	516- 2009	516- 2009		<i>Larix</i> gmelinii Rupr		Июль (δ ¹³ C)		Май Аркти ческие колле бания (δ ¹⁸ O)	Данная paбота Churakova (Sidorova) et al., 2018
	Монгун тайга Алтай Россия	49° с.ш. 87° в.д.	520- 2016	520- 2016		<i>Larix</i> sibirica Ldb	Июль (δ ¹⁸ O)	Июль (δ ¹³ C)		Июнь VPD (δ ¹⁸ O)	Данная paбoта Churakova (Sidorova) et al., 2018
	Акташ Алтай Россия	50 с.ш. 87 в.д.	1831- 2000	1831- 2000		<i>Pinus</i> <i>sibirica</i> Du Tour					Loader et al., 2010 Sidorova et al., 2013
	Коксу Алтай Россия	49 с.ш. 86 в.д.	1778- 2008	1778- 2008		<i>Larix</i> sibirica Ldb					Sidorova et al., 2012, 2013
Леднико- вые керны	Гренландия GISP2 Дания	72° с.ш. 38° з.д		1088 до н.э. 1985 н.э.							Meiert, Stuiver, 1999

	Пик Академии Наук Северная Земля Россия	80° с.ш. 94° в.д.	900- 1998						Opel et al., 2013
	Белуха, Алтай Россия	49° с.ш. 86° в.д.	1818- 2001	Слой таяния 1772- 2003		Июнь-август	Июнь- август		Henderson et al., 2006
			1250- 2000			Март-ноябрь			Eichler et al., 2009
Озерные отложения	Телецкое, Алтай Росся	51° с.ш., 87° в.д.		Ca, Mn, Fe, Ti, Br, Br/Rb, Br/Sr, Br/Y		Средне- годовая 469-1996	Среднег одовая 469-1991		Kalugin et al., 2007
Споро- пыльцевые спектры	Лама Таймырский Полуостров Россия	69° с.ш. 90 в.д.		8000 ¹⁴ C до н.э.	Larix, Pinus, Betula	Январь, июль, средне- годовая	Среднег одовая		Andreev et al., 2004

*https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/ice-core

2. 2. Характеристика исследуемых участков

2. 2. 1.Северо-восток Якутии (ҮАК)

Особенности физико-географических условий северо-востока Якутии предопределяют состав и структуру растительных сообществ района исследований (Рисунок 2.1, голубой круг). На территории Среднеиндигирской низменности отчетливо выделяются две растительные зоны - зона кустарниковых тундр и лесотундровая. На плоскогорных формах рельефа, отмечается резко выраженная высотная поясность. Кустарниковые и травяно-кустарничковые тундры занимают выровненные пойменные и надпойменные террасы в долинах крупных притоков р. Индигирка. Доминируют ерниковые и низинные ивняковые сообщества. Лесная растительность представлена единственной лесообразующей породой - лиственницей Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) (Фотография 2. 1).

a)

б)



Фотография 2. 1. Лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) 945 лет (а) и остатки отмершей древесины 1216 лет (б) [Сидорова и др., 2005 а]. Фотографии М.М. Наурзбаева.

Лиственничные лесотундровые сообщества отличает низкая продуктивность IV-V классов бонитета, разреженный древесный ярус (с сомкнутостью крон до 0,5) и доминированием в приземном ярусе растительности типично-тундровых сообществ.

Фундамент Среднеиндигирской низменности сложен дислоцированными мезозойскими отложениями, покрытыми толщей рыхлых четвертичных отложений, главным образом аллювиального происхождения. Поверхность провинции характеризуется небольшими колебаниями высот в прибрежной части (50-80 метров над уровнем моря) с характерными аласными понижениями и широкими долинами крупных рек. Над поверхностью равнины возвышаются невысокие сопки и гряды, сложенные гранитами и эффузивами. Эти пологосклонные формы рельефа Кондаковского плоскогорья характеризуют орографию типичного геоморфологического строения водораздельного плоскогорья Среднеиндигирской низменности.

Климат данного района резко континентальный. Продолжительность зимнего периода - около 8 месяцев (с конца сентября-начала октября до середины мая). Средние температуры января колеблются от -34° до -38° С. Снежный покров сохраняется на протяжении 250-270 дней, достигая максимальной мощности в марте до 25-35 см., на открытых пространствах. Лето сравнительно холодное и короткое, при средней температуре июля 8-12° С. Продолжительность вегетационного периода, 50-70 дней и может варьировать в зависимости от года. Годовое количество осадков 205 мм., основная масса осадков приходится на теплый период. Среднегодовая температура воздуха -14,7° С относительно периода с 1950 по 2000 (Таблица 2. 1).

Низменность находится в зоне многолетней («вечной») мерзлоты, что обуславливает низкую активность почвообразовательных процессов. Преобладают торфяно-глеевые и маломощные глеевые почвы в тундровой зоне и глеево-мерзлотно-таежные под редкостойными северо-таежными лесами в южной части провинции.

Охарактеризуем типичный участок сбора образцов с ныне живущих старовозрастных деревьев и давно отмерших сухостойных деревьев, сохранившихся на дневной поверхности на месте произрастания. Участок приурочен к верхней части пологого склона ЮЗ-экспозиции. Представляет собой наклонную верхнюю террасу, плавно переходящую в плоский отрог водораздельной гряды. Среднюю часть склона (250-300 м. над уровнем моря) занимает каменистая осыпь, сложенная крупнообломочным материалом.

Лиственничные редколесья и редины с сомкнутостью древесного яруса до 0.3, представлены разновозрастными древостоями с разреженным кустарниковым ярусом и

33

доминированием в приземном ярусе растительности тундровых растительных группировок. Этот участок характеризуется ерниковой и ивняковой группой типов леса. Преобладают свежие местообитания с мозаичным почвенным покровом, нанорельеф которого сформирован выходом крупнообломочного материала. Распространены щебнистосуглинистые горно-тундровые мерзлотные почвы.

Лишайниково-моховой покров развит слабо, обычен в кронах старовозрастных деревьев. Доминируют багульниковые и ерниковые серии групп типов леса с выраженной дифференциацией древесного морфометрическим показателям. яруса ПО Это старовозрастное поколение с 0,1-0,2 единицы участия, диаметром на высоте груди до 26 см. Со средней высотой деревьев от 6 до 9 м. Деревья данной группы отличаются глубоко трещиноватой корой, плоской низкоопушенной кроной. Более 50% деревьев суховершинные с комлевой, бурой деструктурной и стволовой гнилью. Старовозрастное поколение возникло на рубеже первого и второго тысячелетий. Молодое поколение и подрост, возникшее в 30-50-е годы XX века доминирует в рединах на современном верхнем пределе произрастания лиственницы - 200-350 м. над уровнем моря. Поколение отличает хорошая сохранность и выраженная экспансия в заселении безлесных пространств. Средняя высота деревьев 5 - 6 метров, диаметр на высоте груди 6 см, с хорошо развитой низко опущенной кроной.

Разреженный древесный ярус отличает наличие большого количества сухих стволов различной сохранности, с соотношением отмерших и живых деревьев- 1,5:1,0 (до 2,0:1,0), до 2/3 сухостоя представлено ветровалом. Наибольшее количество отмерших деревьев, в виде стоящих вертикально и поваленных остатков стволов, представляют поколения деревьев, возникшие в первой половине XX века. Наиболее старые живые деревья, с собственным возрастом 878 и 885 лет, представлены поколением, возникшим в «малый климатический оптимум» голоцена. Наиболее старые отмершие деревья, найденные в этом районе, имеют собственный возраст 1104 года (Рисунок 2.1, синий круг). Это абсолютно зафиксированный рекорд не только для деревьев долгожителей рода *Larix* [Сидорова и др., 2005], но и для всех древесных растений бореальной зоны Северного полушария [Ваганов и др., 2000].

На северо-востоке Якутии, в окрестностях горы Ат-Хая 69⁰ 24' с.ш. и 148⁰ 25' в.д. на верхней границе леса в лесотундровой и лесорастительной зоне Среднеиндигирской низменности, с отметками высот 200-350 метров над уровнем моря проведены сборы

дендрохронологического материала (диски и буровые образцы) с ныне живущих старовозрастных и давно отмерших деревьев, сохранившихся на дневной поверхности произрастания. На современной верхней границе леса в долине ручья Кусаган-Мастах, маршрутными и с закладкой пробных площадей, сборы дендрохронологического материала проведены в подгольцовых лиственничных редколесьях и рединах.

2. 2. 2. Восточная часть полуострова Таймыр (ТАҮ)

Восточная часть Таймырского полуострова (Рисунок 2. 1, черный круг) представлена притундровыми лесами, к которым относятся зональная равнинная лесотундра, предтундровые и подгольцевые редкостойные леса и редколесья (Абаимов, 1997). Лиственничные редины и редколесья Ары-Маса занимают пойменную и надпойменные террасы в среднем течении реки Новая. Древесная растительность представлена единственной лесообразующей породой лиственницей Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) (Фотография 2. 2).

б)

a)



Фотография 2. 2. Лиственница Гмелина 630 лет (а) и остатки отмершей древесины 830 лет (б). Фотографии М. М. Наурзбаева.

Редколесья и редины Va-Vб классов бонитета с сомкнутостью крон до 0,5, представляют собой крайне северный современный предел произрастания лиственницы [Крючков, 1974; Ары-Мас, 1978]. Характер распределения растительности отличает

приуроченность растительных группировок к ландшафтно-образующим формам рельефа. Данный район относится к багульниковой группе типов леса.

Современная верхняя граница леса в долине реки Котуй, характеризуется подгольцовыми лиственничными редколесьями и рединами. Еррасированные склоны трапповых водораздельных гряд Котуйского плато, примыкают к устьям рек Кындын и Котуйкан.

Охарактеризуем типичный участок сбора образцов с ныне живущих старовозрастных деревьев (керны) и давно отмерших (диски) деревьев, сохранившихся на дневной поверхности по месту произрастания в течении более чем 1500 лет. Участок приурочен к верхней части террасированного склона СВ-экспозиции. Представляет собой наклонную верхнюю террасу, плавно переходящую в плоский отрог водораздельной гряды. Нижняя часть террасы обрывается крутым уступом, каменистая осыпь которого сложена крупнообломочным материалом. Островки леса полосой, прерываемой ложбинами временных водотоков, занимают нижнюю часть предводораздельной трапповой террасы. Лиственничные редколесья и редины с сомкнутостью полога до 0,3, представлены разновозрастными лиственничными древостоями с разреженным кустарниковым ярусом и доминированием в приземном ярусе растительности тундровых растительных группировок. Преобладают свежие местообитания с мозаичным почвенным покровом, нанорельеф которого обусловлен выходом крупнообломочного материала. Распространены горнотундровые мерзлотные почвы, и в местах выходов траппов грубо-скелетные. Лишайниковомоховой покров развит слабо, обычен в кронах старовозрастных деревьев. Доминируют групп рододендровые И осоково-дриадовые серии типов леса с выраженной дифференциацией древесного морфометрическим яруса по показателям. Это старовозрастное поколение, с 0,1-0,2 единицы участия, диаметром на высоте груди от 12 до 18 см. со средней высотой яруса от 6 до 14 м. Такие деревья отличаются глубокотрещиноватой корой, плоской низкоопушенной кроной. Более 50% деревьев этой группы имеют комлевую бурую деструктурную гниль. Эти поколения в данном районе возникли на рубеже XII и XIII-го веков. Средневозрастное поколение (вторая половина XIXго, первая половина XX в.), характеризуется хорошо развитой низкоопущенной пирамидальной кроной с 0,3-0,4 участия, с диаметром на высоте груди от 8 до 14 см., со
средней высотой яруса от 5 до 12 м. Молодое поколение (подрост), господствует на современном верхнем пределе произрастания лиственницы. Поколение отличает хорошая сохранность и выраженная экспансия в заселении безлесных пространств 0,5 и более единиц участия в редколесьях, доминирование в рединах на современном верхнем пределе произрастания лиственницы.

Характеристика древостоя, обобщенной серии групп типов леса, на современном верхнем пределе произрастания лиственницы Гмелина содержит разреженный древесный ярус с наличием большого количества сухих стволов различной сохранности, с соотношением отмерших и живых – 1,5: 1,0 (до 2,0 : 1,0), до 2/3 сухостоев представленных ветровалом. Наибольшее количество отмерших деревьев, в виде стоящих вертикально и поваленных остатков стволов, представляют поколения деревьев возникшие в первой половине текущего тысячелетия и отмерших в календарные периоды 1450-1550 гг., 1640-1720 гг., в первой половине XIX века. Наиболее старые живые деревья, с собственным возрастом до 600 лет, представлены поколением возникшим на рубеже XII-XIII-го веков и приурочены к свежим и проточно-увлажненным местообитаниям.

Климат Таймырской низменности субарктический континентальный. Средняя температура января на востоке низменности достигает –35°С, июля + 8-10°С. Количество осадков для этих широт минимально, около 269 мм., в год. Среднегодовая температура -13,2 °С относительно периода метеорологических наблюдений метеостанции Хатанга с 1950 до 2000 (Таблица 2. 1). Безморозный период длится 65 дней [Абаимов и др., 1997].

Аккумулятивные террасы голоценовых отложений имеют типично ленточное строение. В обнажениях часто проявляются нестратифицированные аллювиальные отложения с песчано-алевристыми или глинистыми осадками и деформированной слоистостью, древесные остатки («слой дров») преимущественно аллохронного происхождения. Практически, довольно сложно идентифицировать древесные остатки по происхождению в связи с интенсивным переотложением органического материала. В связи с этим, значительный интерес представляют находки древесины, погребенной в прижизненном состоянии с вертикальным положением прикомлевой части и сохранившейся корневой системой. Географическое (широтное) положение подобных находок, по мере

накопления данных, служит материалом познания пространственно-временной динамики растительных формаций [Антропоген Таймыра, 1982; Украинцева и др., 1989].

Охарактеризуем типичное строение аллювия голоценовых отложений пойменной террасы в среднем течении реки Новая на примере разреза АМ №18. Это строение основано на живом напочвенном покрове с оторфованным почвенным горизонтом и наличием живых корней. Механический состав почвогрунта представлен суглинком светло серого цвета, с мощностью горизонта до 0,4 м. Торфяной горизонт характеризуется рассеянной прослойкой пронизанного отмершими корнями современной кустарниковой серого суглинка, растительности и алевритовыми прослойками в нижней части горизонта, мощностью горизонта до 1,0 м. Суглинок серый представляет выраженную слоистость фракций тонко и мелко зернистого песка с алевритовыми включениями, с мощностью горизонта от 0,5 до 0,7 м. Алеврит с прослоями серого тонкозернистоститого ржавого песка и выраженным горизонтом «дров» с наклонными слойками органического вещества, мощность горизонта от 0,3 до 0,7 м. Суглинок серый неясно слоистый, переходит в вечномерзлый грунт, видимая мощность - более 1,0 м.

Дендроклиматические исследования по живым и остаткам отмерших деревьев лиственницы Гмелина (*Larix Gmelinii* Rupr.) проведены на востоке Таймыра и Путорана на современном северном пределе произрастания лиственницы (72° 28' с.ш.), в урочище Ары-Мас Таймырского биосферного заповедника; в пределах современной верхней границы леса, с абсолютными отметками высот 200-300 м. над уровнем моря (река Котуй 70° 30' - 71° 00' с.ш.); а так же по древесным остаткам голоценовых аллювиальных отложений пойменных и надпойменных террас крупных притоков реки Хатанга, в районе ограниченном 70° 30' - 73° 00' с.ш. Маршрутными исследованиями по сбору полуископаемой древесины охвачены аллювиальные отложения рек Большая Балахня, на протяжении 600 км. от устья реки; Новая, на протяжении 120 км.; верховье реки Попегай –30 км.; реки Боганида; Хета, и реки Хатанги. Сбор древесного материала выполнен Наурзбаевым М.М.

2. 2. 3. Высокогорный Алтай. Монгун тайга (MOG)

Область исследования относится к Алтае-Саянскому региону в южной Сибири, в центральной части северо-азиатского континента Монголии. Рельеф местности достаточно сложен и характеризуется разными микроклиматическими условиями, влиянием различных циркуляционных моделей. Алтае- Саянский регион представляет мозаику лиственничных лесов, степей и альпийских лугов. Участок Монгун (Тыва) расположен на склоне северовосточной экспозиции и представлен основным видом лиственницы Сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) (Фотография 2.3).



Фотография 2. 3. Участок сбора образцов с живых деревьев лиственницы сибирской (а) и остатки стволов отмершей древесины (б). Фотографии В. С. Мыглан.

Сбор дендрохронологического материала с живых деревьев лиственниц *Larix sibirica* Ldb., произрастающих на Монгун тайге, расположен в пределах 5-7 км., от ледника Монгун тайга (3917 м н.у.м). Образцы деревьев были собраны на высоте 2280-2340 м. н.у.м, которая лежит в близи границы леса (2250-2400 м. н.у.м.). Возраст деревьев достигает 600 лет (Фотография 2. 3 б). максимальное оттаивание мерзлоты достигает 80-100 см. Таяние снега обычно происходит в конце мая начале июня, с выпадением снега уже в августе-сентябре.

2. 3. Метеорологические данные

В данной работе использовались ежемесячные данные метеорологических станций, расположенных вблизи участков исследования: северо-востока Якутии (YAK), востока Таймыра (TAY), и Алтая (MOG) (Таблица 2. 2). Данные по температуре воздуха, атмосферным осадкам, дефициту упругости водяного пара, суммарной продолжительности солнечного сияния за месяц были получены из Российской метеорологической базы данных <u>http://meteo.ru/it/178-aisori</u>, [Апасова, Клещенко, 2011]. Приведенные в таблице данные, обозначенные звездочками получены из литературных источников *[Abaimov, 1997; Hughes et al., 1999; Churakova (Sidorova) et al., 2016b]; **[Naurzbaev et al., 2002]; ***[Sidorova et al., 2011]. Ежедневные данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам были использованы по метеорологической станции Чокурдах для включения расчётных климатических блоков экофизиологических моделей [Churakova (Sidorova) et al., 2016b], описание которых более подробно будет рассмотрено в п. 2.8. данной главы.

Арктические колебания (AO) [Hodges, 2000] – климатическая изменчивость в Северном Полушарии, характеризующаяся циркуляцией ветра по часовой стрелке вокруг Арктики 55° с.ш. Когда AO находится в положительной фазе, тогда сильные ветра циркулируют вокруг Северного Полюся и приносят с собой холодный воздух и отсутствие осадков вдоль полярных регионов в течение зимы. Когда ветра стихают, то происодит смена на негативную фазу AO, когда происходит смещение холода к средним широтам Северного Полушария https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/ao/.

			Период наблюдений				ro	cM.	D o	MM
Координаты	Вид хвойных	Метео станция	Температура	Осадки	Продолжительность солнечного сияния июля, час	Дефицит упругости водяного пара	Длина вегетационно периода	Глубина сезонногс оттаивания мерзлоты,	Среднегодовая температура воздуха.	Среднегодовое количество осадков,
69° с.ш,	Larix	Чокурдах	1950-	1966-	1961-	1950-	50-70*	20-50*	-14,7	205
148° в.д.	cajanderi	62° с.ш.	2000	2000	2000	2000				
YAK	Mayr.	147 ° в.д.								
		61 м. н.у.м.								
70° с.ш,	Larix	Хатанга	1950-	1966-	1961-	1950-	90**	40-60**	-13,2	269
103° в.д.	gmelinii	71° с.ш.	2000	2000	2000	2000				
TAY	Rupr.	102 ° в.д.,								
		33 м. н.у.м.								
50° с.ш,	Larix	Мугур-Аксы	1963-	1966-			90-120***	80-100***	-2,7	153
89° в.д.	sibirica	50° с.ш.	2000	2000						
ALT	Ledeb.	90° в.д.								
		1850 м.								
		н.у.м.								

Таблица 2. 2. Характеристики исследуемых участков и местоположений метеорологических станций.

2. 4. Отбор образцов древесины для анализа стабильных изотопов углерода и кислорода

Отбор образцов древесины для анализа стабильных изотопов углерода и кислорода проводился из коллекции образцов лиственницы для трех районов исследования: северовостока Якутии (YAK) [Сидорова и Наурзбаев, 2002; Сидорова, 2003], востока Таймыра (TAY) [Naurzbaev et al., 2002; Сидорова, 2003] и Монгун тайга, Алтая (ALT) [Мыглан и др., 2009]. Сбор отмершей древесины лиственниц из северо-востока Якутии и востока Таймыра, сохранившейся на дневной поверхности, осуществлялся при помощи бензопилы «Тайга» на высоте 1,3 метра от корневой шейки. Для взятия полуископаемой древесины необходимо было провести визуальный осмотр ствола, сделать контрольный спил, чтобы исключить загниление. Отмечалось стратиграфическое положение древесного горизонта с краткой характеристикой обнажения. В отдельных случаях, прежде всего для моделей с собственным возрастом 400 и более лет, с тонкими годичными слоями и плохой сохранностью структуры древесины, образцы дублировались на иных высотах ствола во избежание выпавших колец. Для района Монгун тайга, Алтай образцы включали керны как с живых деревьев лиственницы, взятых при помощи возрастного бура, которым высверливались радиальные керны древесины диаметром 4-5 мм., и длинной 10-50 см. [Методы, 2000], так и остатки отмершей древесины. Данные образцы были собраны в ходе экспедиций 2006-2016 в рамках проектов, выполняемых в Институте леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия и Сибирском Федеральном Университете (В. С. Мыглан). Образцы брались на высоте 1,3 метра от корневой шейки ствола с модельных деревьев, в основном старовозрастных и средневозрастных. Эти поколения отчетливо различаются по морфометрическим показателям: диаметром ствола, типом кроны, наличием отмерших скелетных ветвей и корой. Для каждого поколения бралось не менее чем 25 буровых образцов. Полученные керны укладывались в специальные бумажные контейнеры для перевозки и маркировались для определения номера и участка сбора образцов.

2. 4. 1. Подготовка древесных образцов к анализу стабильных изотопов углерода и кислорода

Отбор образцов для анализа стабильных изотопов был осуществлен из коллекций собранного материала, в основном полуископаемой древесины и остатков исторической (полуископаемой) древесины хорошей сохранности, найденной на поверхности земли для трех районов исследования [Сидорова и Наурзбаев, 2002; Сидорова, 2003; Naurzbaev et al., 2002; Мыглан и др., 2009]. По данным мастерских хронологий, полученных ранее и абсолютных календарных дат, образцы выпиливались из дисков с необходимым интервалом перекрытия. Далее, образцы выбирались по радиусу или радиусам с отсутствием выпавших колец, избегая при этом те участки, где имеются заросшие сучки, гнили, реактивная и раневая древесина.

После выпила на сегменты образцы вновь были измерены и перекрестно датированы, относительно каждого образца для установления точного календарного года (Фотография 2.4).



Фотография 2. 4. Установка LINTAB V –3.0 для измерения ширины годичных колец древесных образцов. Лаборатория дендрохронологии, Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (2005 г.).

В данной работе эта процедура осуществлялась под бинокуляром Лейка (*Leica*) при 20-60 кратном увеличении. При таком увеличении можно выявить довольно тонкие кольца, содержащие всего 2-3 слоя клеток. На этом этапе распознавались лишь видимые кольца. Датировка и маркировка колец проводилась путем нанесения на поверхность определенных колец отметок при помощи ручки или тонкой иглы. Карандаш не был использован, так же, как и другие маркирующие вещества, содержащие компоненты углерода, которые могут повлиять на содержание δ¹³С в целлюлозе и древесине годичных колец.

Измерение ширины годичных колец, приготовленных образцов производилась с помощью полуавтоматической компьютерной установки LINTAB V – 3.0, которая преобразует электронный сигнал в цифровой [Rinn, 1996] (Фотография 2.4).

По измеренным образцам были получены индивидуальные древесно-кольцевые хронологии. При помощи программы COFECHA, Version 6.02p [Holmes, 1983] для них были выявлены временные периоды перекрытия и рассчитаны основные статистические характеристики. Для выявления выпадающих и ложных колец была использована программа TSAP 3.6 [Rinn, 1996].

После того, как все образцы, выпиленные на радиальные сегменты, были проверены методом перекрестного датирования, образцы помещались в аппарат Сокслетта для удаления смол из образцов лиственницы в течение 48 часов в этанол-метаноле 1:1, а затем промывались в дистиллированной воде при температуре 70°С.

Для каждого образца под бинокуляром (Фотография 2. 5 а) было проведено фрагментированное деление по годичному кольцу (включающие зону ранней и поздней древесины) (Фотография 2. 5 б) при помощи скальпеля (Фотография 2. 5 в). Первые 30-50 лет в образцах не были рассмотрены для анализа стабильных изотопов [Gagen et al., 2007; Duffy et al., 2017], так как этот период определяет период интенсивного роста деревьев и могли бы оказывать влияние т. н. возрастного тренда на дальнейшую интерпретацию результатов.

Каждый фрагмент годичного кольца был измельчен в ультра мельнице (Фотография 2. 5 г). Полученная навеска делилась для анализа древесины (Фотография 2. 5 д) и целлюлозы (Фотография 2. 5 е). Далее каждый образец (годичное кольцо) отдельно для каждого дерева

и периода взвешивался при помощи весов примерно 5 мг и паковались в отдельные пакеты из термостойкого материала (F57, США).



Фотография 2. 5. Подготовка образцов к анализу стабильных изотопов.

2. 4. 2. Экстракция целлюлозы из годичных колец деревьев и подготовка образцов к анализу

Запакованные и промаркированные пакеты с образцами помещались в специальные огнеупорные колбы, которые ставились в ванну с дионизированной водой, нагретую до 70°С и под действием ультразвука промывались в течение 2 часов в 5 % растворе NaOH для удаления липидов, смол и голоцеллюлозы. Раствор 7 % NaClO₂ был применен в течение 36 часов для удаления лигнина. Затем пакеты с образцами древесины были высушены в течение

24 часов при температуре 50° С в специальном сушильном шкафу и распакованы, относительно маркировочного номера образца и года. Экстракция α -целлюлозы выполнялась по общепринятой методике, описанной Лоадером [Loader et al., 1997]. Далее, образцы целлюлозы для каждого отдельного года и каждого древесного образца были взвешены и упакованы в серебряные капсулы 0,6-0,8 мкг. для измерения соотношения ¹⁸O/¹⁶O в целлюлозе. Для измерения соотношения ¹³C/¹²C в целлюлозе образцы с навеской от 0,1 до 0,3 мкг. упаковывались в жестяные капсулы.

2. 5. Измерение стабильных изотопов углерода и кислорода

Измерение стабильных изотопов углерода ¹³C/¹²C и ¹⁸O/¹⁶O в древесине и целлюлозе проводилось при помощи масс-спектрометра Дельта C, фирмы Финниган, Бремен, Германия, соединенный с элементным анализатором (EA-1110, Италия) в лаборатории атмосферной химии Института Пауля Шеррера (Швейцария) (Фотография 2. 6).



Фотография 2. 6. Подготовка образцов целлюлозы к измерениям на масс-спектрометре Дельта С, фирмы Финниган, Бремен, Германия, соединенный с элементным анализатором (EA-1110, Италия). Институт Пауля Шеррера, Швейцария. Содержание углерода определялось путем сгорания образцов под воздействием окисления при температуре 1080° С [Saurer et al., 1997]. Данный анализ гарантирует высокую разрешающую способность δ^{13} C: $\sigma \pm 0.1$ ‰, δ^{18} O: $\sigma \pm 0.2$ ‰. Соотношение 13 C/ 12 C и 18 O/ 16 O рассчитывалось согласно стандартному уравнению:

$$δ образца = (Rобразца/Rстандарта-1) • 1000 (%),$$
(2. 1)

где R- отношение ¹³C/¹²C и ¹⁸O/¹⁶O в образце к стандарту VPDB для углерода и VSMOW для кислорода.

2. 5. 1. Корректировка данных по соотношению ¹³C/¹²C и ¹⁸O/¹⁶O в целлюлозе годичных кольцах деревьев

Качественный контроль измеренных образцов был проведен относительно измеренных стандартов и скорректирован с учетом средних значений и стандартных отклонений.

2. 5. 2. Корректировка данных по соотношению ${}^{13}C/{}^{12}C$ относительно $\delta^{13}C$ атмосферного CO_2

Данные, полученные по δ^{13} С в древесине и целлюлозе были скорректированы относительно δ^{13} С атмосферной концентрации СО₂ для современного периода, вследствие увеличения углекислоты в течение 1800 - 2016 гг. [Francey et al., 1999; http://www.cmdl.noaa.gov./info/ftpdata.html].

2. 5. 3. Дополнительные корректировки данных по соотношению ${}^{13}C/{}^{12}C$ относительно $\delta^{13}C$ атмосферного CO_2 и «пин» коррекции 1, 2 порядка

Дополнительные корректировки данных по соотношению ${}^{13}C/{}^{12}C$ относительно $\delta^{13}C$ атмосферного углерода CO₂ и так называемые «пин» коррекции необходимы в тех случаях, когда $\delta^{13}C$ в древесине или целлюлозе показывают существенное снижение содержания

углерода в образце, даже после применения стандартной процедуры корректировки δ¹³C относительно содержания CO₂ в атмосфере. Пред-индустриальная «пин» коррекция, разработанная Маккэролл с соавторами [McCarroll et al., 2009] учитывает изменения активного отклика деревьев при увеличении CO₂ и увеличении использования воды.

Значительное уменьшение δ^{13} С после 1960-х гг. обусловлено изменением активного отклика деревьев на увеличение содержания углекислоты в атмосфере к более пассивному. Данная коррекция была успешно применена в данной работе для районов высокогорного Алтая.

2. 6. Расчет эффективности использования воды древесными растениями (iWUE)

Эффективность использования воды древесными растениями является результатом увеличения СО₂ относительно локальных/региональных климатических изменений. Наличие воды и минерального питания только модулирует использование воды древесными растениями, но не изменяет функцию отклика.

Таким образом, δ^{13} С в органических тканях описывается соотношением фотосинтеза (A) к устьичной проводимости (g_s) (2. 2), которая определяется увеличением углерода к максимальным потерям воды, и определяется как эффективность использования воды [Farquhar et al., 1982; Saurer et al., 2014].

WUEi = A /
$$g_s = (c_a - c_i) / 1,6$$
 (2. 2)

где с*_a* концентрация CO₂ во внешней среде, с*_i* концентрация CO₂ внутри листа/хвои, и 1,6 соотношение диффузии воды и CO₂ в воздухе.

2. 7. Методы и модели реконструкции климата

В дендроклиматологии статистический анализ изменчивости прироста деревьев, т. н. временных рядов традиционно реализуется вычислением оценочных показателей сгруппированных в блок анализа вариаций («Analisis of Variance», ANOVA) [Fritts, 1976; Методы..., 1990]. Рассмотрим основные статистические характеристики, используемые в данной работе.

Для количественной характеристики годичных колебаний прироста наиболее часто используется коэффициент чувствительности (2. 3), введенный в дендрохронологию А. Е. Дугласом:

$$\mathbf{K}_{r} = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=n-1} \left(\frac{2(x_{t+1} - x_{t})}{x_{t+1} + x_{t}} \right)$$
(2.3)

где, x - ширина годичного кольца, или индекс прироста за год t;

n - длительность ряда (лет).

Коэффициент чувствительности дает оценку относительных различий в изменчивости соседних колец, т.е. показывает степень воздействия в основном внешних факторов на изменение величины прироста. Серия колец считается чувствительной, когда средний коэффициент чувствительности больше 0,3. Существует зависимость коэффициента чувствительности от количества усредненных моделей: с увеличением числа повторностей коэффициент чувствительности снижается.

Если коэффициент чувствительности показывает относительные различия величин соседних годичных колец, то амплитуду погодичной изменчивости прироста характеризует величина среднеквадратического отклонения. Считается, что чем выше коэффициент чувствительности и среднеквадратическое отклонение, тем более сильный климатический сигнал зафиксирован хронологией. При величине среднеквадратического отклонения превышающей значение 0,2, данный временной ряд пригоден для дендроклиматических реконструкций [Erlandsson, 1936].

Для оценки тесноты связи между временными рядами деревьев (хронологиями) вычисляется коэффициент корреляции (коэффициент Пирсона),

$$r_{x,y} = \sum (xi - \bar{x}) \cdot (yi - \bar{y}) / \sqrt{\sum (xi - \bar{x})^2} \sum (yi - \bar{y})^2$$
 (2.4)

где x_i — значения переменной X; y_i — значения переменной Y; \bar{x} — среднее арифметическое для переменной X; \bar{y} -среднее арифметическое для переменной Y.

Параметрический линейность показатель, характеризующий связи между сравниваемыми рядами [Fritts, 1976]. Средний межсериальный коэффициент корреляции служит оценочным показателем при анализе взаимосвязи между множеством деревьев, используется при тестировании индивидуальных серий и отдельных хронологий [Holmes, 1986]. Кросс-корреляционный анализ служит средством оценки тесноты связи (с переменным шагом запаздывания) при тестировании «плавающих» хронологий, перекрестном датировании, выявлении ложных и выпавших колец [Holmes, 1983].

Для оценки сходства сравниваемых временных рядов и уточнения перекрестной датировки серий годичных колец в дендрохронологии используется коэффициент синхронности [Huber, 1943], показывающий степень воздействия общих факторов на радиальный прирост индивидуальных деревьев. С. Г. Шиятов ввел эмпирически разработанную классификационную шкалу для оценки уровня синхронности между временными рядами [Шиятов, 1986].

Индивидуальная изменчивость абсолютных и индексированных значений радиального прироста может содержать значительную автокорреляционную составляющую вследствие физиологических причин [Fritts, 1976]. Обычно такую составляющую достаточно адекватно моделируют авторегрессионым (AR) процессом [Cook, 1990] или процессом авторегрессионого скользящего среднего (ARMA) [Guiot, 1986].

Для реконструкции климатических параметров использовались данные метеорологических станций (Таблица 2. 1). Чтобы проверить полученную модель, общий временной интервал наблюдений делился на две независимые части: калибровка (для оценки коэффициентов регрессии и статистического качества модели) и периода проверки (для оценки прогноза модели). Были рассчитаны статистические значения, такие как коэффициент корреляции Пирсона (r), коэффициент детерминации (R²), критерий Фишера (F-критерий) [Cook, Kairiukstis, 1990]. Для оценки синхронности между реконструкцией и исходными климатическими временными рядами, а также оценки статистической адекватности модели регрессии, был вычислен коэффициент синхронности (Кс)

[Hettmansperger, 1984]. Для тестирования автокорреляции первого порядка в остатках статистического регрессионного анализа была рассчитана статистика Дурбина-Ватсона (DW) с низким и верхним критическими уровнями [Durbin, Watson, 1971]. Статистически достоверные интервалы представлены значениями *P*<0,0001.

2. 8. Применение экофизиологических моделей для описания погодичной изменчивости стабильных изотопов в годичных кольцах на примере деревьев лиственниц, произрастающих на северо-востоке Якутии

Для выявления взаимодействия между лесными экосистемами (деревьями) и изменениями гидрологических изменений (влажность воздуха, влажность почвы, осадки) под воздействием температуры и изменений CO₂ в атмосфере; для выявления наиболее важных климатических переменных, которые оказывают влияние на внутригодовую динамику δ^{13} C и δ^{18} O в годичных кольцах древесины и целлюлозы; для описания использования воды деревьями, произрастающими на вечной мерзлоте и под воздействием и змененыя термических и гидрологических составляющих изменения уровня оттаивания мерзлоты, были применены экофизиологические и процессные модели.

2. 8. 1. Модели, описывающие соотношение стабильных изотопов углерода в годичных кольцах деревьев

2. 8. 1. 1. Модель - «б¹³С Орхидея»

Глобальная биогеохимическая модель «ORCHIDEE», «Орхидея» в деталях описана Криннером с соавторами [Krinner et al., 2005]. «Орхидея» моделирует обмен между энергией, водой и CO₂ внутри континуума почвы- растительности-атмосферы, температуры, относительной влажности, продолжительности солнечного сияния с временным разрешением в 30 минут. Входными параметрами в модели являлись: атмосферные осадки, влажность, температура воздуха, солнечная радиация, скорость ветра, давление, концентрация CO₂ в атмосфере. В модели «Орхидея» рассматривается только стандартный теплообмен. Входным параметром был определен смешанный тип почв. Рассматриваемый пример в данной работе базировался на суглинистом типе почвы 85%, 10% песок and 5% глина с pH = 6. Модель была рассмотрена для глубины почвы до двух метров. Для корней, их плотность задана глубиной, описанной экспоненциальной функцией (корневая плотность экспоненциально уменьшается вглубь почвы).

Модель «Орхидея» была использована для моделирования годичного прироста и соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе для периода с 1900 по 2004 гг. Входной параметр наличия воды определялся тремя составляющими: дождем, талой водой, отложениями воды на поверхности (в качестве замороженной воды и росы). Вода может покидать резервуар почвы через процессы транспирации, эвапотрансприрации, схода вод и дренажа. Засушливые условия были рассчитанны как функция содержания воды в почве к экспоненциальному профилю корней. Функция водного стресса влияет на транспирацию через модуляцию устьичной проводимости и дальнейшего адаптирования в хвое. В настоящее время данная модель существенно преобразована и улучшена, с включением блока естественного опада (прореживания) [Bellassen et al., 2010] для моделирования прироста, использующая измеренные аллометрические показатели продуктов фотосинтеза между листьями, стволом, корнями и ветвями. Среднее значение первичной продукции (NPP), рассчитывалось неравномерно для различных классов по диаметру ствола. Так, маленькие деревья имеют меньше NPP по сравнению с большими [Deleuze, Dhote, 2004].

Временные серии годичных колец (мм.) для различных классов по диаметру деревьев были включены во входные параметры «Орхидеи». Данные параметры были смоделированы и сопоставлены с реальными измерениями. Первые 10 лет роста деревьев, вследствие ювенильной стадии или большого периода роста [Cook et al., 1990] не рассматривались.

2. 8. 1. 2. Модель - LPX- Bern

Для выявления процессов, которые могут оказывать влияние на рост древесных растений в зоне многолетней мерзлоты через взаимодействие с осадками, процессами

52

замерзания и оттаивания почвы, была рассмотрена модель обменных процессов земной поверхности (LPX-Bern 1.0), разработанная в Университете Берна, Швейцария [Spahni et al., 2013; Stocker et al., 2013]. LPX - Вегп модель является улучшенной моделью Лунд-Потсдам-Йена (LPJ), динамичной глобальной вегетационной моделью [Sitch et al., 2003; Gerten et al., 2004]. LPX- Вегп моделирует потоки воды, углерода и азота между наземными экосистемами (почва и вегетация) и атмосферой с дневным временным разрешением. Моделирование прироста как средней величины возраста деревьев, конкурирующих за свет, воду и питательные вещества ограничена биоклиматическими пределами температуры воздуха и CO₂.

В дополнении, модель включает температуру почвы, промерзание и оттаивание почвы, а также описание мерзлоты [Wania et al., 2009]. Моделирование мерзлоты в модели LPX- Bern использует 8 типов почв [Wania et al., 2009]. В данной работе использовался общий тип почв, который был калиброван для различных типов почв, растительности и экосистем. Модуль мерзлоты в модели был сопоставлен с активным слоем почвы для 20 участков циркумполярной сети, включающим 8 участков в России, 3 из которых находятся в Центральной Якутии [Wania et al., 2009]. Моделирование сезонных температур почвы были сравнены с измерением четырех станций в циркумполярном регионе [Wania et al., 2009]. Наличие мерзлоты влияет на глубину корней и дефицита упругости водяного пара, который модифицирует транспирацию растений через изменения в устьичной проводимости. Рассчитанная устьичная проводимость и скорость фотосинтеза моделирует эффективность использования воды и ассимиляцию углерода [Saurer et al., 2014]. Для включения блока погодных эффектов на вариацию содержания стабильных изотопов углерода (δ^{13} C) в LPX – Bern модели, общее количество ежемесячных осадков распределены случайно к описанному числу дождливых дней в течение месяца. Для этого распределения использовалась стохастическая модель Маркова первого порядка, где вероятность дождя зависела от предыдущих дней [Richardon, 1981; Srikanthan, McMahon, 1985]. Однако, LPX - Bern модель не учитывала теплопередачу с осадками. Модель использует повторение начальных климатических условий для периода с 1901 по 1931 гг. с постоянными данными по содержанию углекислоты и азота с 1901 г. С такими условиями модель апробирована для последних 1500 лет к калибровочному периоду 1901-2004 гг. Модель выделяет блоки с

чистой первичной продукцией (NPP), являющейся результатом разницы фотосинтеза и автотрофного дыхания без расчета индивидуального прироста деревьев. Сравнения с параметрами ширины годичных колец деревьев ограничены количественными взаимосвязями между наблюдаемыми внутригодовыми изменениями ширины годичного кольца к внутригодовым изменениям NPP, выделенного для каждого года к заболони.

2. 8. 1. 3. Модель наземной биосферы (ССМ4.5)

Модель (CLM) версия 4.5 [Oleson et al., 2013] была использована как компонента наземной составляющей, где каждая клетка грида являлась множественной, независимо представленной компонентой. В моделе были использованы 15 различных фенологических групп: вечнозеленые, сохраняющихся дольше чем один год; сезонно-лиственные, с одним сезоном роста за год (главным образом температура и длина дня); лиственные, с потенциально множественными сезонами роста в год (температура и влажность почвыконтрольные условия).

2. 8. 1. 4. Экофизиологическая имитационная модель Беньковой-Шашкина (BS)

Модель Беньковой-Шашкина (BS) [Бенькова, Шашкин, 2003], основана на биохимической модели Фаркуара [Farquhar et al., 1982]. Стандартное уравнение дискриминации углерода, описывается следующим образом [Farquahar et al., 1982]:

$$δ13C Φотосинтез = (δ13Cатмосфера − Δ13C) / (1 + Δ13C),$$
(2.5)

где Δ^{13} С фотосинтетическая дискриминация изотопа углерода, преимущественное поглощение более легкого изотопа 12 CO₂.

В ВS-модель включены дневные климатические данные и расчеты скорости фотосинтеза и дыхания, водного баланса в почве и изменения устьичной проводимости, так же функции влажности почвы и относительной влажности воздуха [Бенькова, Шашкин, 2003; Vaganov et al., 2006].

Дискриминацию стабильных изотопов при фотосинтезе Бенькова-Шашкин [Бенькова, Шашкин, 2003], описывали по уравнению Фаркуара (2.5) (Farquahar et al., 1982), в которое был добавлен третий член для учета изменения δ^{13} С в атмосфере.

$$\Delta = a + (b - a)\frac{c_i}{c_a} + \delta^{13}C_{cor}, (2.5)$$

где *а* – эмпирическая константа, отвечающая за дискриминацию при диффузии газа из атмосферы внутри листа, значение ее составляет -4,4‰; b–дискриминация при карбоксилировании, -27‰; c_i – концентрация CO₂ внутри листа, моль моль⁻¹; c_a – концентрация CO₂ в воздухе, моль•моль⁻¹, $\delta^{13}C_{cor}$ – погодичные значения для изотопного состава в атмосферном CO₂, ‰ [McCarroll, Loader, 2004]. Изотопный состав годичного кольца рассчитывался, как взвешенное среднее по значениям фотосинтеза:

$$\delta^{13}C_{annual} = \frac{\Sigma \Delta_i A_i}{\Sigma A_i} \qquad (2.6)$$

где A_i – скорость ассимиляции CO₂, ммоль м⁻²сут⁻¹, Δ_i – изотопный состав ассимилятов в i – сутки. При определении изотопного состава годичного кольца предполагается, что на формирование кольца в течение сезона роста влияет доля углерода, синтезированного при фотосинтезе. Это положение оправдано тем, что годовой фотосинтез, рассчитанный по модели хорошо согласуется с шириной годичных колец [Бенькова, Шашкин, 2003].

Для описания устьичной проводимости использовалось уравнение путем замены *h* через обратную связь с дефицитом упругости водяного пара (VPD) учитывая влияние влажности почвы:

$$g = g_0 + g_1 \cdot A \cdot h / (C_a - \Gamma), \qquad (2.7)$$

где $h = \frac{0.0005}{VPD} \bullet \min(1, \frac{sm - sm_{\min}}{sm_{\max} - sm_{\min}})$, g₀, g₁-постоянные, Γ – компенсационная точка, VPD –

дефицит упругости водяного пара, *sm* – влажность почвы, *sm_{min}*, *sm_{max}* –минимальная и максимальная влажность почвы [Бенькова, Шашкин, 2003].

Выходной параметр δ^{13} С ORCHIDEE, LPX - Вегп были скорректированы относительно δ^{13} С атмосферного CO₂ [Francey et al., 1999]. Модель «Орхидея» включает расчет транспортировки новых продуктов фотосинтеза от листа к стволу со смещенной транспортировкой компоненты углерода к предыдущим годам, т.е. запасенного ранее, чем отличается от LPX - Вегп и ВS моделей. В LPX- Вегп модели смещенная ремобилизация углерода не рассматривается, и моделирование δ^{13} С отражается в годовых запасах биомассы углерода.

Фотосинтез и первичная продукция углерода моделируется как ежедневный показатель. Предполагается, что δ^{13} С дневного NPP (чистая первичная продукция, англ. Net Primary Production) $\approx \delta^{13}$ С дневного GPP (валовая первичная продукция, англ. Gross Primary Production). Среднемесячные и годовые значения δ^{13} С усреднялись по взвешенным значениям дневных и ежемесячных NPP, где NPP > 0.

2. 8. 2. Модели, описывающие соотношение стабильных изотопов кислорода в годичных кольцах

Модифицированная версия наземно-биосферной модели ORCHIDEE, механическая модель Роден-Лин-Элирингер [Roden et al., 2000] (RLE) и LPX- Вегп модели для имитации изменений δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец были впервые применены для северо-востока Якутии.

2. 8. 2. 1. Механическая модель Роден-Лин-Элирингер (RLE)

Модель RLE рассматривает изотопное соотношение в листе как процесс транспирации относительно уравнения Крэга и Гордона [Crag, Gordon, 1965], и Догманна [Dongmann et al., 1974].

$$\delta^{18}O_{\text{испарение}} = \delta^{18}O_{\text{источник}} + \varepsilon_{\text{e}} + \varepsilon_{\text{k}} + (\delta^{18}O_{\text{пар}} - \delta^{18}O_{\text{источник}} - \varepsilon_{\text{k}}) \bullet e_{\text{a}}/e_{\text{i}}$$
(2.8),

 ε_k - кинетическое фракционирование (необратимая реакция), в большинстве случаев когда субстрат трансформируется в другой продукт. Фракционирование является обратным к тяжелым стабильным изотопам (СО₂ поглощённый Рибулозо-1,5-бисфосфат (рибулозо-1,5-дифосфат, РуБФ) и трансформированный в 3-Фосфоглицериновую кислоту (3-ФГК, 3-фосфоглицерат). Такой процесс часто катализируется ферментами, где продукт является необратимым и разделяется под воздействием трансформации к различным продуктам.

ε_e -термодинамическое фракционирование (равновесие). Субстрат изменяется к продукту, когда может возвращаться в начальную форму субстрата, соответственно процесс достигает равновесия.

Для включения пограничного слоя и диффузии сквозь устьицу для моделирования содержания воды внутри листа было сделано расширенное описание (2. 9) [Farquhar et al., 1989; Flanagan et al., 1991; Roden et al., 2000].

$$\mathbf{R}_{wl} = \alpha \bullet [\alpha_k \mathbf{R}_{ws} (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s/\mathbf{e}_i) + \alpha_{kb} \mathbf{R}_{wx} (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_a/\mathbf{e}_i) + \mathbf{R}_a (\mathbf{e}_a/\mathbf{e}_i)]$$
(2.9),

где *wl, a, i, s, wx* – вода внутри листа, воздух, *c_i*- вода на поверхности листа и ксилемы (источник воды), соответственно. α –фактор равновесия пара при фракционировании и вариации температуры (Majoube, 1971). α_k – кинетическое фракционирование, ассоциированное с диффузией в воздухе; α_{kb} - кинетическое фракционирование, ассоциированное с диффузией через пограничный слой и рассчитанный как увеличение α_k к 2/3 (¹⁶O/¹⁸O =1,0189) [Roden et al., 2000; Flanagan et al., 1991].

Композиция изотопного состава в целлюлозе представлена функцией изотопного соотношения субстрата сахарозы и воды в синтезе целлюлозы листвы/хвои, корней, ксилемы как части годичного кольца [Roden et al., 2000]. Содержание δ^{18} O в целлюлозе годичных колец рассчитывается как:

$$\delta^{18}\mathcal{O}_{cx} = f_0 \bullet (\delta^{18}\mathcal{O}_{wx} + \varepsilon_0) + (1 - f_0) \bullet (\delta^{18}\mathcal{O}_{wl} + \varepsilon_0)$$
(2.10),

где f_0 - фракция обмена с водой ($\delta^{18}O_{wx}$) и оценивается значением 0,42 для кислорода, для контрольных экспериментов [Roden, Ehleringer, 2000]. Ксилема целлюлозы (*cx*), содержания воды в ксилеме (*wx*), воды в листе (*wl*) являются частью синтеза сахарозы. Параметр ε_0 описывает биохимическое фракционирование взаимодействуя с карбоксильной группой в (\approx 27 ‰) [Sternberg, DeNiro, 1983; Luo, Sternberg, 1992].

Модель RLE была использована для определения лучшей подборки параметров для δ¹⁸О в целлюлозе, модифицирующей источник воды, потенциально используемой деревьями лиственницы. Входные параметры такие как максимальная температура воздуха и относительная влажность воздуха были получены по данным метеорологической станции Чокурдах для периода с 1948 по 2004 гг. Так как данные по содержанию δ^{18} О атмосферного пара отсутствуют, предполагалось, что δ^{18} О атмосферного пара на 11 ‰ легче, чем вода выделенная и проанализированная в почве и корнях деревьев лиственницы для Сибирского района исследования. Так, первая аппроксимация была в диапазоне значений -28 и -25 ‰, для изменений в снеге и талой воде, соответственно [Saurer et al., 2016] и -6 ‰ до -11‰ в дожде. Барометрическое давление меняется в зависимости от высоты и погодных условий. Вследствие этого, предполагалось, что функция высоты, в нашем случае 350 м. н. у. м. для района исследования на северо-востоке Якутии составляет 95 kPa [Pearcy et al., 1989]. Данные по значениям устьичной проводимости могут иметь широкий диапазон, однако, мы использовали 0,3 моль м⁻² с⁻¹, предполагая низкую устьичную проводимость для хвои лиственниц, произрастающих в холодных климатических условиях. Вода в листе и в целлюлозе были имитированы относительно уравнений (2. 9, 2. 10), соответственно [Churakova (Sidorova) et al., 2016b].

2. 8. 2. 2. Модель - «б¹⁸О Орхидея»

Модель включает в расчет фракционирование в момент испарения от поверхности почвы и в пределах листа в результате транспирации. Это основано на модифицированной версии уравнения Крэйг и Гордона [Craig, Gordon, 1965] и описывается испарением легких изотопов кислорода (¹⁶O), относительно тяжелых (¹⁸O) в состоянии покоя. Однако, модель не принимает во внимание фракционирование, ассоциированное с диффузией в фазе испарения в почве [Melayah et al., 1996]. Главный эффект, контролирующий δ^{18} O соотносится к насыщению ¹⁸O в листе, когда происходят процессы транспирации почвенной воды, которая главным образом, контролирует изотопный сигнал осадков и климата.

ГЛАВА 3. Изменения климата и окружающей среды на северо-востоке Якутии

3. 1. Изотопный состав (б¹³С, б¹⁸О) в древесине и целлюлозе годичных колец лиственниц Каяндера для средневекового и современного периодов

Представляется ценным изучить соотношение изотопов углерода и кислорода в древесине и целлюлозе годичных колец деревьев лиственниц Каяндера, произрастающих в зоне многолетней мерзлоты на северо-востоке Якутии для выявления изменений климата и окружающей среды в течение двух периодов:

(1) – с интенсивным влиянием антропогенных воздействий, таких как изменение состава атмосферы, увеличение интенсивности землепользования, изменение климата и сезонности (1880-2004 гг. н.э.);

(2) с минимальным воздействием человеческого фактора в течение начала средневекового периода (900-1000 гг. н.э).



Рисунок 3. 1. Индивидуальные хронологии для каждого дерева, года и содержания углерода (δ¹³C) и кислорода (δ¹⁸O) в древесине (а, в) и целлюлозе (б, г) для периода с 1945 г. по 2004

г. Толстой черной линией показаны средние хронологии по четырем использованным в анализе деревьям [Sidorova et al., 2008; Сидорова и др., 2010].

На рисунке 3. 1 а-г показаны δ^{13} С и δ^{18} О в древесине и целлюлозе, полученные по четырем отдельным деревьям. Наибольшие корреляции между четырьмя деревьями были найдены для δ^{13} C, по сравнению с δ^{18} O. Диапазон корреляционных коэффициентов между этими временными рядами по δ^{13} С в древесине составляет r = 0,56-0,83 (p < 0,05) и лишь немного ниже для целлюлозы r = 0,51-0,79 (p < 0,05) (Рисунок 3. 1 a, б). Коэффициенты корреляции между отдельными деревьями для δ^{18} О ниже, чем для δ^{13} С, и показывают значения r = 0,40-0,66 (p < 0,05) для целлюлозы и для древесины r = 0,30-0,65 (p < 0,05) (Рисунок 3. 1 в, г). Высокие статистические корреляционные связи между четырьмя деревьями наблюдались для периода с 1990 г. по 2004 г. Результаты показывают, что значения δ^{13} C как для древесины, так и целлюлозы демонстрируют более низкую межгодовую изменчивость, чем значения δ^{18} О. После усреднения временных серий по отдельным деревьям в обобщенную хронологию было получено среднее значение $\delta^{13}C$ древесины и δ¹³С целлюлозы. Для устранения эффекта атмосферного CO₂, вследствие снижения δ^{13} С атмосферного CO₂ в течение последних 200 лет [Francey et al., 1999] была проведена корректировка (см. Глава 2, 2. 5.1 и 2. 5. 2). На рисунке 3. 2. представлены исходные данные по содержанию углерода в древесине годичных колец лиственницы Каяндера и корректированные данные (2) относительно данных по содержанию δ^{13} С атмосферного CO₂ (3). Уменьшение δ^{13} C в органическом веществе объясняется уменьшением δ^{13} С атмосферного CO₂, результатом которого является сжигание ископаемого топлива, крупномасштабной биомассы (в тропических лесах). После коррекции данные показывают более положительную направленность (Рисунок 3. 2).



Рисунок 3. 2. Хронологии, полученные по δ^{13} С в древесине, исходные данные (1) без учета корректировки δ^{13} С атмосферного CO₂ (1) и (2) δ^{13} С в древесине с учетом корректировки для периода с 1880 г. по 2004 гг., [Sidorova et al., 2008].

В применении дополнительных корректировок для дальнейшего климатического анализа не было необходимости.

Средние значения для хронологий по содержанию изотопов углерода и кислорода, как для хронологий по древесине, так и для целлюлозы, а также разницы между двумя компонентами были рассчитаны для периодов (904-2004 гг.; 900-1000 гг.) и представлены на рисунке 3. 3.



Рисунок 3. 3. Сравнительный анализ между δ¹³С и δ¹⁸О в древесине и целлюлозе для периодов: 1880-2004 гг., (а, б) и 900-1000 гг. (в, г), а также разница между компонентами древесины и целлюлозы [Sidorova et al., 2008; Сидорова и др., 2010].

Данные периоды исследования были разделены на 50-летние периоды (Таблица 3. 1). Сравнительный анализ средних значений стабильных изотопов в течение средневекового периода для 900-950 гг. и 950-1000 гг. показывает небольшие различия между δ^{13} С древесины и целлюлозы (0,14 ‰ и 0,05 ‰, соответственно), однако большие различия были выявлены для δ^{18} О в целлюлозе (0,52 ‰). Сравнение средних значений изотопов для периодов 1904-1954 гг. и 1954-2004 гг. показало разницу 0,13 ‰ для δ^{13} С в древесине и 0,48 ‰ для δ^{13} С в целлюлозе. Различия в значениях δ^{18} О между теми же периодами составили 0,80 ‰ для древесины и 0,16 ‰ для целлюлозы. Сравнительный анализ средних значений δ^{13} С, δ^{18} О древесины и целлюлозы между текущим (1904-2004 гг.) и средневековым (900-1000) периодами показывают перекрытия (Таблица 3.1) [Сидорова и др., 2010].

Период	δ^1	³ C	δ ¹⁸ Ο		
	древесина	целлюлоза	древесина	целлюлоза	
1904-1954	-25,95	-24,30	15,95	18,98	
1954-2004	-25,82	-23,82	15,15	19,14	
1904-2004	-25,88	-24,05	15,55	19,06	
900-950	-25,72	-24,31	15,57	18,55	
950-1000	-25,86	-24,36	15,64	19,07	
900-1000	-25,79	-24,34	15,61	18,82	

Таблица 3. 1. Средние значения δ^{13} С и δ^{18} О в древесине и целлюлозе.

Для исследования сходства сигналов в древесине и целлюлозе, был проведен корреляционный анализ между хронологиями по древесине и целлюлозе для современного периода (1904-2004 гг.) и начала средневекового периода (900-1000 гг.), показывая, что хронологии, полученные по древесине и целлюлозе, имеют сходные тенденции (Рисунок 3. 3 а, 6; Таблица 3. 2). Тем не менее, существуют значительные различия между древесиной и целлюлозой для двух изотопных хронологий. Эти различия не являются постоянными в течение времени. Так, δ^{13} С древесины и целлюлозы значимо коррелируют между собой (r = 0,92, *p* <0,05) для 1904-2004 гг., однако они имеют разницу в значениях около 2 ‰, демонстрируя общий сигнал, что объясняется увеличением концентрации CO₂ в атмосфере (Рисунок 3. 3) (Таблица 3. 2). Хронологии по δ^{13} С в древесине и целлюлозе полученные для начала средневекового периода с 900 г. н. э. по 1000 гг. н. э. (Рисунок 3. 3, 6), также имеют высокую корреляцию (r = 0,85; *p* <0,05), но с меньшим смещением изотопных данных между хронологиями (1,45 ‰) (см. Таблица 3. 2, столбец 2).

Таблица 3. 2. Коэффициенты корреляции (r) и разницы между значениями δ¹³C и δ¹⁸O в древесине и целлюлозе для средневекового и современного периодов.

Период	(г) между δ ¹³ С в древесине и целлюлозе	Разница между δ ¹³ С в древесине и целлюлозе, ‰	(г) между δ ¹⁸ О в древесине и целлюлозе	Разница между 8 ¹⁸ О в древесине и целлюлозе, ‰
1904-2004	0,92	1,83	0,63	3,51
1954-2004	0,97	1,99	0,92	3,99
1904-1954	0,88	1,83	0,56	3,51
900-1000	0,85	1,45	0,72	3,21
950-1000	0,91	1,50	0,78	3,43
900-950	0,80	1,41	0,68	2,97

p<0,05.

Значения коэффициентов корреляции между δ^{13} С в древесине и целлюлозе были выше для периода с 950 г. по 1000 г. н.э., (r = 0,91; *p* <0,05), чем для периода с 900 г. по 950 г. н.э. (r = 0,80; *p* <0,05). Наибольшее различие до 3,99 ‰ наблюдалось между δ^{18} О в древесине и целлюлозе в течение современного периода с 1954 г. по 2004 г. Значения δ^{18} О для средневекового периода с 950 г. по 1000 г. были ниже (3,43 ‰) (Рисунок 3. 3 в, г; Таблица 3. 2).

Впервые уникальные хронологии по содержанию стабильных изотопов углерода и кислорода в древесине и целлюлозе годичных колец лиственниц, были получены для климатически чувствительного региона северо-восточной части Якутии. Ранее, для района восточной Якутии, территории государственного заказника «Сунтар Хаята» (63° с. ш., 139° в. д., 900 м. н. у. м.). Николаевым с соавторами [Николаев и др., 2006] была получена хронология по содержанию стабильных изотопов углерода в целлюлозе годичных колец

лиственницы для периода с 1600 г. по 2000 г., которая согласуется с новой длительной хронологией по δ¹³С северо-востоку Якутии.

Различия между древесиной и целлюлозой в годичных кольцах лиственницы Каяндера [Sidorova et al., 2008] варьировались от 2 ‰ для δ^{13} С и до 4 ‰ для δ^{18} О в течение средневекового и современного периодов. При условии, что эти различия не будут меняться со временем, как древесина, так и целлюлоза могут быть одинаково хорошо пригодны в качестве палеоклиматических источников. На основании этого факта, анализ целлюлозы был выполнен для других периодов, с целью сопоставления новых изотопных хронологий с хронологиями по целлюлозе, полученными для других районов исследования. Полученные результаты согласуются с данными, опубликованными Борелла с соавторами [Borella et al., 1998], а также Лоадер и др. [Loader et al., 2003], где сообщалось, об относительно постоянной разнице между δ^{13} С в древесине и целлюлозе [Leavitt, Danzer, 1993; Borella et al., 1998], и в большей степени для δ^{18} O [Gray, Thompson, 1977; Borella et al., 1998; Barbour et al., 2001], предполагая, что подобная климатическая информация содержится в обеих компонентах. Данные по δ^{18} О из древесных колец свидетельствуют о том, что фракции изотопа кислорода, более сложны, чем для углерода, включая, например, изотопный обмен с гидроксильными группами в метаболических реакциях как в листьях, так и в стволе деревьев [Roden et al., 2000]. Целлюлоза часто считается более надежным климатическим параметром для кислорода, чем древесина [Roden et al., 2000; Sidorova et al., 2008].

Результаты показывают, что изменения изотопного состава кислорода в древесине и целлюлозе различны, и что отклонения не являются случайными, и более того проявляют тенденции деградации с течением времени. Саурер и соавторы [Saurer et al., 1997] показали, что в некоторых случаях на изотопы углерода и кислорода влияют одни и те же факторы окружающей среды (например, доступность почвенной воды), поскольку устьичный контроль и транспирация могут влиять на изотопные отношения, хотя механизмы изотопного фракционирования, связанные с углеродом и кислородом, совершенно разные.

Для последних 50 лет современного периода обнаружено, что изотопные значения древесины и целлюлозы показывают наибольшие различия, но при этом статистически значимо коррелируют друг с другом. Эти изменения в соотношении древесины и целлюлозы с течением времени можно объяснить: 1) изменениями климатических факторов

66

(температура / осадки) [Barbour et al., 2001], в частности экофизиологическим откликом деревьев на увеличение атмосферного CO₂; 2) изменением соотношения различных компонент древесины (соотношение целлюлоза / лигнин, сахароза, липиды, крахмал и другие компоненты); и 3) составных различий в сердцевине и заболоне древесины [D'Alessandro et al., 2004].

Сравнительный анализ средних значений изотопов δ^{13} С, δ^{18} О в древесине и целлюлозе между текущим и средневековым периодами потепления показывает значительное перекрытие, возможно свидетельствующее о схожих климатических условиях [Sidorova et al., 2008].

3. 2. Построение длительных хронологий по $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в целлюлозе годичных колец лиственниц Каяндера с 516 г. н. э. по 2004 г. н. э.

Выше описанные результаты, полученные по содержанию стабильных изотопов углерода и кислорода в годичных кольцах хвойных по индивидуальным деревьям, позволили выявить значимые статистические связи между отдельными деревьями и показали возможность объединения в средние обобщенные хронологии. Так же было показано, что целлюлоза является более устойчивым параметром к изменениям условий окружающей среды и часто используется для построения климатических реконструкций. На основании выше сказанного, дальнейший анализ будет представлен на основе объединения каждого исследуемого года для четырех деревьев вместе [Сидорова и др., 2010; Sidorova et al., 2010].

Длительные хронологии по δ^{13} С (Рисунок 3. 4) и δ^{18} О (Рисунок 3. 5) в целлюлозе годичных колец лиственницы Каяндера с 516 по 2004 гг. н.э. были получены с погодичным временным разрешением на основе 48 перекрестно-датированных образцов. Средний возраст образцов, включенных в хронологию составил 308 лет. Перекрытие образцов по периодам составило не менее четырех.

Нормировав хронологию к нулю для выявления минимальных и максимальных значений относительно среднеквадратического отклонения (σ) для всего исследуемого периода было выявлено, что экстремальные значения со среднеквадратичным отклонением

67

(± 3 σ) для всей длинны хронологии (n= 1489) составляет около 0,2%. В частности, (≤ - 3 σ) для 1122 г., 1538 г., 1540 г., а (≤ + 3 σ) для 814 г., 828 г., 1036 г.; для + 2 σ (2,2 %), - 2 σ (2, 4%), +1 σ (14,5 %), и для -1 σ (12,6 %) (Таблица 3. 3, Приложение Таблица 3. 1, Рисунок 3. 4).



Рисунок 3. 4. Длительная хронология по содержанию углерода в целлюлозе годичных колец деревьев для периода с 516 г. по 2004 г. н.э.



Рисунок 3. 5. Длительная хронология по содержанию кислорода в целлюлозе годичных колец деревьев (516 - 2004 гг. н.э).

Среднеквадратическое отклонение с экстремальными минимумами (- 5 σ) найдено для δ¹⁸О в целлюлозе для 1259 г. и 1263 г. н.э. Отклонение (- 3 σ) выявлено для 1258 г. и 1269 г. н.э. (Приложение, Таблица 3. 2). Минимумы, зафиксированные в 1258 г. и 1259 г. н. э., согласуются с годами мощного стратосферного извержения Самалас [Guillet et al., 2017], которое привело к катастрофическим последствиям по всему Земному шару. Экофизиологический отклик деревьев на данное вулканическое событие рассмотрим подробно в главе 9.

3. 3. Климатические факторы, оказывающие влияние на изменение соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода в годичных кольцах

Рассчитанные коэффициенты корреляции между метеорологическими данными метеостанции Чокурдах и данными, полученными для δ^{13} С и δ^{18} О в целлюлозе годичных колец деревьев лиственницы позволили выявить основные климатические факторы, оказывающие наибольшее воздействие на динамику изотопов углерода и кислорода. А именно, выявлено, что температура воздуха и дефицит упругости водяного пара в июле оказывают наиболее значимое влияние на содержание δ^{13} С в целлюлозе годичных колец деревьев. В то время как продолжительность солнечного сияния июля оказывает значимое воздействие на изотопов кислорода в целлюлозе.

3. 4. Реконструкции климата для северо-востока Якутии по данным стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец лиственниц Каяндера

Ранее, проведенные исследования по ширине годичных колец деревьев указывали на то, что только температура воздуха оказывает наибольшее влияние на рост лиственниц, произрастающих на многолетне-мерзлотных почвах [Шиятов и др., 1986; Hughes et al., 1999; Сидорова, Наурзбаев, 2002; Сидорова, 2003]. Однако, применение стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец позволило выявить влияние дополнительных климатических факторов, которые невозможно было выявить, используя только измерения ширины годичных колец деревьев. А именно, по данным δ¹³С в целлюлозе

годичных колец лиственниц, произрастающих в зоне многолетней мерзлоты на северовостоке Якутии помимо вляния температуры воздуха обнаружено влияние дефицита упругости водяного пара в июле, а по данным δ^{18} О влияние продолжительности солнечного сияния в июле.

3. 4. 1. Реконструкция температуры воздуха июля по данным $\delta^{13}C$ в целлюлозе

Рассчитанные статистические оценки модели реконструкции (Таблица 3. 3) указывают на возможность применения регрессионного уравнения:

Реконструкция температуры июля =
$$(57,01360+(1,92006 \cdot \delta^{13}C))+0,11$$
 (3. 1),

Таблица 3. 3. Статистические значения для периодов калибровки и верификации между температурой воздуха июля и δ¹³С в целлюлозе годичных колец.

	Ка	либров	Верификация					
Период	R	\mathbb{R}^2	F-	DW	Период	R	\mathbb{R}^2	Kc
			критерий					
1950-2004	0,58	0,33	26,47	1,46				
			df=1,53					
			<i>p<0,001</i>					
1950-1977	0,72	0,52	26,3	1,79	1977-2004	0,70	0,48	0,76
			df=1,25					
			<i>p<0,001</i>					
1977-2004	0,54	0,29	10,2	1,42	1950-1977	0,48	0,33	0,41
			df=1,25					
			<i>p<0,001</i>					

Средняя температура воздуха июля, рассчитанная на основе линейной регрессионной модели (3. 1) для периода с 516 г. по 2004 г. н. э. составляет \approx + 9,7°C. Минимальное значение температуры \approx +3,6°C приходится на 1122 г. н. э, а максимальное \approx + 15,2 ° C на 1036 г. относительно всего исследуемого периода (516 г. по 2004 г. н. э.).

Полученная реконструкция температуры воздуха июля, по содержанию δ^{13} С в целлюлозе указывает на экстремально теплые периоды средневекового потепления для VIII,

XI и XX в. н. э. (Рисунок 3. 6). Экстремально холодные периоды были выявлены для отдельных периодов VI, XII-XIII, XV-XVI, XVIII вв. Полученные данные согласуются с ранее полученными исследованиями по хронологиям ширины годичных колец деревьев [Hughes et al., 1999; Сидорова, 2003].



Рисунок 3. 6. Реконструкция температуры воздуха июля, по данным δ^{13} С в целлюлозе годичных колец лиственниц Каяндера.

Результаты так же указывают на то, что температура воздуха июля для периода с 1950 г. по 2004 г. увеличилась примерно на +1,7°С относительно периода с 516 по 1949 гг. н. э.

3. 4. 2. Реконструкция дефицита упругости водяного пара в июле по данным $\delta^{13}C$ в целлюлозе

Линейное регрессионное уравнение (3. 2) было рассчитано для периода калибровки и верификации (Таблица 3. 4). Реконструкция дефицита упругости водяного пара

 $= (30,56024 + (0,89408 \cdot \delta^{13}C)) + 0,13$ (3. 2)

Реконструкция дефицита упругости водяного пара июля по данным δ¹³С в целлюлозе годичных колец лиственниц Каяндера (3. 2) была рассчитана для периода с 516 г. н. э. по 2004 г. н. э. (Рисунок 3. 7).

Таблица 3. 4. Статистические значения для периодов калибровки и верификации между дефицитом упругости водяного пара июля и δ¹³С в целлюлозе.

	Ка	либровн	ca	Верификация				
Период	R	R ²	F-	DW	Период	R	R ²	Kc
			критерий					
1959-2004	0,49	0,24	14,17	1,82				
			df=1,44					
			P<0,001					
1959-1981	0,58	0,34	10,78	2,06	1981-2004	0,45	0,20	0,42
			df=1,21					
			P<0,001					
1981-2004	0,45	0,20	5,06	1,81	1959-1981	0,58	0,34	0,58
			df=1,20					
			P<0,001					

Среднее значение VPD в течение периода с 516 г. по 2004 г. составило \approx 8,61 мбар. Минимальное значение VPD \approx 6,1 мбар для июля 1538 г., характеризует данный год как относительно влажный. Максимальное значение было найдено для июля 1036 г., где VPD \approx 11,18 мбар, свидетельствуя о более засушливых условиях. Установлено, что среднее значение июля VPD увеличилось на \approx 0,76 мбар для периода с 1950 г. по 2004 г., по сравнению с периодом с 516 г. по 2004 г. Увеличение температуры воздуха июля \approx 1,7°C (Рисунок 3. 6) и увеличение VPD июля \approx 0,76 мбар свидетельствует о нарастании дефицита влажности воздуха в течение современного периода и указывает на то, что деревья нуждаются в дополнительном источнике воды.


Рисунок 3. 7. Реконструкция VPD июля по данным δ^{13} С целлюлозы.

3. 4. 3. Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния в июле по данным *б*¹⁸О в иеллюлозе

Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния в июле на северовостоке Якутии была рассчитана по данным δ^{18} О в целлюлозе лиственницы на основе линейного регрессионного уравнения:

> Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния (час/месяц) в июле = (-1385,15+(87,27•δ¹⁸O))+0,11 (3.3)

Максимальные и минимальные значения для хронологий были выявлены с 516 г. по 2004 г. н. э. Суммарная продолжительность солнечного сияния в июле для периода с 516 г. по 2004 г. составила около 293 часов за месяц. По данным реконструкции наиболее солнечным был июль 1094 г. (≈ 604 ч/ месяц). В то время, как июль 1259 г. н. э., был облачным. Суммарная продолжительность солнечного сияния в июле для периода с 1950 г. по 2004 г. составляла примерно на 11 часов меньше, по сравнению с периодом с 516 г. по 1949 г. н.э.

Таблица 3. 5. Статистические значения для периодов калибровки и верификации между суммарной продолжительностью солнечного сияния в июле и δ^{13} С в целлюлозе.

	Калибровка					рикация		
Период	R	R ²	F-	DW	Period	R	\mathbb{R}^2	Kc
			критерий					
1959-2004	0,74	0,55	48,8	1,85				
			df=1,41					
			<i>P<0,0001</i>					
1959-1981	0,71	0,50	21,0	1,85	1981-2004	0,71	0,49	0,66
			df=1,21					
			<i>P<0,0001</i>					
1981-2004	0,74	0,55	20,7	1,74	1959-1981	0,74	0,54	0,66
			df=1,17					
			P<0.0001					



Рисунок 3. 8. Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния в июле месяце по данным δ¹⁸О в целлюлозе лиственниц, произрастающих на северо-востоке Якутии.

3. 5. Особенности климатических изменений на северо - востоке Якутии

Рассматривая δ¹³С как косвенный источник, содержащий информацию об изменении температуры и влажности воздуха приходим к выводу, что:

(1) Значимые изменения температуры воздуха в июле стали происходить после 1950х годов, сопровождающиеся увеличением температуры примерно на 1,7°С по сравнению с периодом с 516 г. по 1949 г. Однако, для периода с 1900-1949 гг., характеризующимся менее выраженным воздействием содержания CO₂ в атмосфере по сравнению с периодом 1950 -2004 гг. температура воздуха июля увеличилась $\approx 0,8$ °C. Ранее проведенный анализ по ширине годичных колец деревьев для данного района исследования показал, что по сравнению со средневековым потеплением (IX-XI вв.), амплитуда текущего потепления XX века, а именно для периода с 1945 г. по 1998 г. н. э. оказывается ниже $\approx 1,6$ °C, а разница между пред-индустриальным периодом (1900-1949 гг. н.э.) по сравнению с текущим периодом (1950-1998 гг. н.э.) показала увеличение $\approx 0,6$ °C.

(2) Ранее, базируясь, только на данных по ширине годичных колец деревьев для данного района исследования невозможно было получить информацию о влажности и влиянии продолжительности солнечного сияния. Так было выявлено, что современный климат на территории северо-востока Якутии становится теплее, суше и, в то же время облачнее, по сравнению с периодом средневекового потепления.

(3) Понять, как современное потепление влияет и будет влиять на лесные экосистемы, произрастающие в зоне многолетней мерзлоты, необходимо знать важную информацию не только об изменениях температурного режима, но и об изменении гидрологического режима (источника воды, влажности и т. д.).

Использование анализа стабильных изотопов δ^{13} C, δ^{18} O открывает новые возможности для интерпретации климата в прошлом и совершенствования климатических и экофизиологических моделей для понимания процессов, происходящих в наше время, и получения реалистичных сценариев и оценок видоизменения лесных экосистем в будущем.

3. 6. Применение экофизиологических моделей в исследовании биогеохимических циклов растительных экосистем

В последнее время число экофизиологических исследований в районах многолетней мерзлоты растет [Boike et al., 2013; Bryukhanova et al., 2015; Saurer et al., 2015). Однако, применение параметров ширины годичных колец деревьев из районов многолетней

мерзлоты, с применением экофизиологических моделей, по-прежнему редки [Churakova (Sidorova) et al., 2016b].

В данной работе предполагалось, что лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr.), произрастающие на северо-востоке Якутии, в зоне многолетней мерзлоты могут использовать талую мерзлотную воду, как дополнительный источник питания в периоды засух. Альтернативной гипотезой может быть, что в течение жарких засушливых условий деревья не могут использовать талую мерзлотную воду, так как она все еще является холодной для использования корневой системой либо корневая система еще недостаточно адаптирована к современным изменениям.

Для того, чтобы протестировать данные гипотезы были применены механические экофизиологические модели для моделирования источника воды, используемой деревьями и зафиксированной в содержании изотопов углерода и кислорода в древесине и целлюлозе деревьев лиственницы. Для этого была выявлена взаимосвязь между деревьями и изменением осадков, а так же выявлены изменения в активном слое почвы вследствие изменения глубины активного слоя почвы из-за таяния мерзлоты под воздействием увеличения температуры и CO_2 в атмосфере; выявлены важные климатические переменные, которые воздействуют на внутригодовую динамику δ^{13} С и δ^{18} О в древесине и целлюлозе годичных колец деревьев и, оценено водное питание, используемое деревьями в зоне многолетней мерзлоты, и воздействие глубины оттаивания почвы на рост деревьев и корневой системы.

Для моделирования δ^{13} С и δ^{18} О использовались суточные данные по температуре и осадкам для периода с 1948 г. по 2004 г. Метеорологические данные более раннего периода не были использованы из-за систематических пропусков. Так как модель не может принимать в расчет пропуски в данных, некоторые пропуски были заполнены из базы данных CRU TS 3.10 [New et al., 1999]. Заполнение пропусков в метеорологических данных было использовано в моделях LPX- Bern [Spahni et al., 2013] и ORCHIDEE [Krinner et al., 2005] (см. Глава 2, раздел 2.8) для периода с 1901 г. по 2004 г.

3. 6. 1. Сравнительный анализ измеренных и моделируемых данных по стабильным изотопам углерода

Соотношение изотопов углерода в древесине и целлюлозе годичных колец было измерено отдельно для каждого дерева (n=4) и скорректированно относительно δ^{13} С атмосферного CO₂ [Francey et al., 1999] для периода с 1945 г. по 2004 г. [Sidorova et al., 2008]. Диапазон разброса между индивидуальными δ^{13} С хронологиями в целлюлозе варьировал от 0,003 до 1,9‰, в то время как δ^{13} С в древесине от 0,03 до 2‰ [Sidorova et al. 2008]. Измерения δ^{13} С в древесине и целлюлозе были сопоставлены с модельными значениями δ^{13} С, полученными при помощи моделей: Орхидея (ORCHIDEE), LPX- Вегп и модели Беньковой-Шашкина (BS) с целью выявления согласованности сигналов в изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков, зафиксированных в годичных кольцах деревьев. Данная работа необходима для улучшения интерпретации климатических взаимосвязей и палеоклиматической интерпретации содержания углерода в годичных кольцах вглубь веков. Выявлено, что измеренные δ^{13} С хронологии в древесине и целлюлозе согласуются с моделями BS и ORCHIDEE (Рисунок 3. 9, Таблица 3. 6).



Рисунок 3. 9. Имитационные ORCHIDEE, LPX- Bern и BS δ^{13} C данные относительно измеренных δ^{13} C хронологий для периода с 1945 г. по 2004 г. н. э.

Существенное смещение было найдено между модельными ORCHIDEE δ^{13} С по сравнению с BS и измеренными данными по содержанию углерода в древесине и целлюлозе. Однако, даже при смещении в 4 ‰ между модельными значениями δ^{13} С ORCHIDEE и измеренными δ^{13} С хронологиями они все еще значимо коррелируют (p < 0,05, Таблица 3. 4). Используя модель ORCHIDEE для моделирования δ^{13} С, Данис и др. [Danis et al., 2012] опубликовали подобные результаты, аргументируя, что смещение является строгим атмосферным эффектом, которое может быть изменено при помощи введения корректировки относительно δ^{13} С атмосферного CO₂. Данная процедура была выполнена для модели BS. Однако, относительно модели ORCHIDEE есть предположение, что модель не учитывает разницы между фотосинтезом и δ^{13} С целлюлозы, как дополнительного источника фракционирования в течение пост –фотосинтетических биохимических процессов [Gessler et al., 2014].

Таблица 3. 6. Коэффициенты корреляции между имитационными данными BS, LPX-Bern, ORCHIDEE, RLE и измеренными δ^{13} С и δ^{18} О хронологиями в древесине и целлюлозе.

Модель	Параметр	BS	LPX-	ORCHIDEE	RLE	ORCHIDEE	Древесина	Древесина	Целлюлоза	Целлюлоза
		$\delta^{13}C$	Bern	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$
			$\delta^{13}C$							
BS	δ ¹³ C	1,00								
LPX - Bern	$\delta^{13}C$	0,25	1,00							
ORCHIDEE	$\delta^{13}C$	0,37*	0,27	1,00						
RLE	$\delta^{18}O$	0,30*	0,28	0,37*	1,00					
ORCHIDEE	$\delta^{18}O$	-0,04	0,32*	0,48*	0,39*	1,00				
Древесина	δ ¹³ C	0,74*	0,38*	0,52*	0,28	0,39*	1,00			
Древесина	$\delta^{18}O$	0,16	0,39*	0,29	0,78*	0,28	0,29	1,00		
Целлюлоза	δ ¹³ C	0,32*	0,30*	0,51*	0,16	0,30	0,78*	0,23	1,00	
Целлюлоза	δ ¹⁸ Ο	0,29	0,35*	0,41*	0,92*	0,41*	0,32*	0,84*	0,23	1,00

* *p*<0,05 для периода с 1948 г. по 2004 г.

Измеренные величины между текущими продуктами усваивания (ассимилятами) и целлюлозой показывают различия в диапазоне между 1,8‰ и 2,2‰, где текущий ассимилят имеет более негативные значения углеода чем целлюлоза, подобно разнице, найденной между древесиной и целлюлозой. Тем самым, происходит запуск результирующей изотопной изменчивости $\Delta^{13}C_{c_p}$ -пост-фотосинтетического фракционирования. Из литературных данных известно, что $\Delta^{13}C_{c_p}$ составляет -2±2 ‰ [Boutton, 1996] и +2‰ [Verheyden, 2006]. Основываясь на допущении Верхедена [Verheyden, 2006] можно заключить, что 2‰ коррекция должна быть применена к изначальным выходным данным. Смещение между имитационным содержанием углерода в целлюлозе и реально измеренными данными значительно уменьшится, используя такой подход (Рисунок 3. 9).

Модельные данные по LPX - Bern δ^{13} С имеют разницу с измеренной хронологией по δ^{13} С около 1‰. Модель LPX - Вегп производит более чем постоянные значения δ^{13} С, в среднем -26 ‰. В то время как диапазон δ^{13} С значений в древесине более схож ≈1‰, с более положительными значениями –25‰. δ^{13} С в целлюлозе, как выходной параметр модели BS показывает схожую динамику с наименьшим смещением около 0,31 ‰ для периода с 1945 г. по 2004 г. Причиной более постоянных значений в выходных параметрах LPX - Bern модели может заключаться в том, что условия, заданные в модели ориентированы на достаточное наличие воды в почве в виде атмосферных осадков и таяния мерзлоты. Модель включает данные по температуре, осадкам, солнечной радиации и количеству влажных дней. Относительная влажность и дефицит упругости водяного пара не описывались в LPX - Bern модели. Например, LPX - Bern модель не описывает параметр экстремально низкой влажности. Однако, модель аккуратно рассчитывает δ^{13} C значения и реконструирует эффективность использования воды лесными экосистемами ВДОЛЬ Европейских климатических регионов [Saurer et al., 2014], но по всей видимости, отсутствующими важными процессами, протекающими в таком холодном исследуемом регионе, покрытым многолетней мерзлотой как северо - восток Якутии. Анализ чувствительности был проведен для LPX - Bern модели с включением параметра замерзания почвы и параметра формирования мерзлоты, которые могут влиять на прирост и дискриминацию углерода. В данном моделировании, промерзание было деактивировано, и вода в почве оставалась в состоянии жидкости. Данный эксперимент значимо не изменил выходных параметров δ^{13} C

80

к стандартной модели, которая включает блок промерзания почвы. Данный факт может быть объяснен тем, что рост деревьев ниже +3°С является очень незначительным или стремится к нулю [Körner, 2015]. Таким образом, изотопный сигнал, на который влияет промерзание почвы может быть с трудом зафиксирован в годичных кольцах, вследствии отсутствия роста при низких температурах. Коэффициент корреляции между измеренными δ^{13} C в древесине (r = 0.38; p < 0.05) и целлюлозе (r = 0.30; p < 0.05) по модельным расчетам LPX - Bern остается практически аналогичным к стандартно описанному подходу δ^{13} C в древесине (r = 0,35; *p* < 0,05) и целлюлозе (r = 0,38; p < 0,05) по сравнению с результатами BS или ORCHIDEE моделей. В следствие того, что δ^{13} С данные значимо не отличались между стандартным имитационным блоком и блоком с включением функции оттаивания-замерзания, было заключено, что вариация относительной влажности и VPD на северо-востоке Якутии, по всей атмосферными определяется условиями (верх-низ), видимости, а не почвеннорастительными взаимодействиями (низ-верх). Данные различия выявлены так же при моделировании δ^{13} С для Европейских лесных экосистем [Saurer et al., 2014; Keller et al., 2017]. Однако, если взглянуть на модельные данные глубины оттаивания почвы в LPX - Bern модели (Рисунок 3. 10), корреляция с δ^{13} С в древесине является статистически значимой (r=0,56; *p*<0,05).



Рисунок 3. 10. Модельные данные LPX - Вегп по глубине оттаивания почвы (см.) для июля относительно дефицита упругости водяного пара. Прямые измерения глубины оттаивания

мерзлоты для региона северной Якутии (FD) [Fyodorov-Davydov et al., 2009] в сопоставлении.

Положительные корреляции (более глубокое оттаивание отражается в более положительных значениях) указывает на то, что вода, находящаяся в более глубоких слоях не может быть использована лиственницей, потому что увеличение δ^{13} С указывает на закрытие устьиц, что происходит при дефиците влажности.

Выявлены значимые статистические связи между модельными LPX - Вегп данными по глубине сезонного оттаивания мерзлоты с VPD июня, июля и августа, с наиболее высокими значениями корреляций для VPD июля (r = 0,42; p < 0,05) (Рисунок 3. 10). Положительные корреляции модельного оттаивания мерзлоты с VPD летних месяцев указывает на наличие дефицита влаги в данном районе исследования. Прямые сезонные и погодичные измерения глубины оттаивания мерзлоты, проведенные Федоровым-Давыдовым на севере Якутии [Fyodorov-Davydov et al., 2009] показывают согласованность с данными LPX - Вегп модели (Рисунок 3. 7). Хотя, необходимо отметить, что LPX - Вегп модель не учитывает теплопередачу с осадками. Таким образом, это может влиять на моделирование температуры почвы в течение влажных лет в этом удаленном регионе исследования [Churakova (Sidorova) et al., 2016b].

Сугимото с соавторами [Sugimoto et al., 2002] в своем исследовании показали, что деревья лиственницы (*Larix gmelinii* Rupr.) могут использовать талую воду из слоев почвы до 1,4 м в течение жарких и сухих погодных условий в районе Спасской Пяди. Однако, авторы так же сделали заключение, что оттаивание сезонной мерзлоты может происходить глубже, в зависимости от типа почв, с поправкой, что это может представлять затрудненное использование древесными растениями, в следствие, серьезных повреждений в течение засухи. С другой стороны, в работе Кабл с соавторами [Cable et al., 2013] показано, что оттаивание мерзлоты может послужить результатом активизации более глубоких слоев почвы, что в свою очередь приведет к увеличению активного слоя почвы, который потенциально сможет увеличить объем корневой системы и обеспечить деревья необходимой влагой.

Основываясь на модельных LPX - Вегп данных годовое содержание водной фракции (Рисунок 3. 11) не показывает существенных изменений на глубине >100 см. Однако, на глубине 10 - 20 см. была найдена значимая корреляция с δ^{13} С в древесине (r = 0,36; *p* < 0,01).



Рисунок 3. 11. Изменение LPX-моделируемой среднегодовой доли воды для разных глубин почвы и δ¹³С данными, измеренными в древесине и целлюлозе годичных колец лиственниц. Глубина почвы представлена: 0 -10 см.; 10 - 20 см.; 20 - 30 см.; 50 - 70 см.; 70 - 100 см.; 100 - 150 см.; 150-200 см.

Значимые статистические связи были выявлены так же между модельными фракциями воды в почве на глубине 20-30 см. (r = 0,40; p = 0,002) и 30-40 см. (r = 0,32; p = 0,014), а также температурой воздуха июля, соответственно. Эти связи указывают на то, что деревья лиственницы имеют доступ к воде в активном слое 20-30 см.

Кабл и соавторы [Cable et al., 2013] в своем исследовании показали, что на Аляске, температура почвы в июле на глубине 10 см. соотносится с активным органическим слоем почвы и является важным источником, влияющим на процессы транспирации и устьичной проводимости. Подобные результаты исследований были опубликованы Руесс и соавторами

[Ruess et al., 2006], кто выявил, что корни деревьев способны использовать воду на глубине 20 см.

Модельные значения использования воды на глубине от 0-10 см. и 10-20 см. значимо коррелируют с VPD июня (r = 0,41; p = 0,007 и r = 0,51; p = 0,001), соответственно. В то время как модельные значения LPX - Вегп указывают на использование воды деревьями на глубине 10-20 см. и 20-30 см. коррелируя с VPD июля (r = 0,44; p = 0,003; и r = 0,32; p = 0,038), соответственно.

Хронологии, полученные по δ^{13} С в древесине и целлюлозе, указывают на засушливые условия, ведущие к закрытию устьиц и увеличению содержания ¹³С. Увеличение температуры в начале сезона роста возможно все еще недостаточно для оттаивания мерзлоты до той температуры, когда деревья могут использовать талую воду. В следствие чего, вода из почвы является ограниченным ресурсом для деревьев. В дополнении, недостаточное количество осадков в начале сезона роста и отсутствие достаточного количества влаги, поступаемое из почвы может приводить к локальным засушливым условиям. Отрицательные корреляции между модельными значениями для глубины почвы 10 см. были найдены с VPD сентября, указывая на то, что вода в почве на данной глубине замерзает. Исследования Бойке с соавторами [Boike et al., 2013] на острове Самойлов, дельта реки Лена (72° с. ш, 126° в. д.) в 2004 г. показали, что оттаивание почвы начинается примерно 15 июня, а замерзание 29 сентября. Данный факт может подтверждать установленные климатические связи для деревьев лиственниц, произрастающих на северо-востоке Якутии [Churakova (Sidorova) et al., 2016b].

3. 6. 2. Оценки гидрологического режима по модельным данным соотношения стабильных изотопов кислорода

Так как очень мало известно о влиянии атмосферных осадков и об источнике воды, используемого деревьями лиственниц на северо-востоке Якутии и на севере Сибири, в целом, были применены модели ORCHIDEE, RLE и LPX - Bern (см. Описание Глава 2, 2. 8.

 для тестирования связей между модельными и измеренными данными по δ¹⁸О в древесине и целлюлозе (Рисунок 3. 12).



Рисунок 3. 12. Исходные ряды моделей ORCHIDEE и ORCHIDEE_кор с корректировкой значений в 8 ‰ и смещением, а также хронологией RLE δ^{18} O по сравнению с измеренными δ^{18} O хронологиями в древесине и целлюлозе годичного кольца.



Рисунок 3. 13. Временные ряды модельных значений источника воды RLE δ¹⁸O и данных по температуре воздуха и атмосферных осадков июля, а также дефицита упругости водяного пара (VPD), полученных по данным метеостанции Чокурдах для периода с 1948 г. по 2004 г. Хронологии нормированы относительно нуля.

Диапазон разницы между индивидуальными δ^{18} О хронологиями в целлюлозе составлял от 0,01 до 3,4‰, а для δ^{18} О в древесине от 0,08 до 3,3‰, что входит в рамки среднего диапазона измерений [Sidorova et al., 2008]. Модельные данные источника воды, используемого деревьями, произрастающими в зоне мерзлоты показаны на рисунке 3. 13.

Статистически значимые связи были выявлены между измеренными δ^{18} О в древесине и целлюлозе годичных колец и модельными значениями. Модель ORCHIDEE показывает диапазон разницы между хронологиями примерно 8 ‰. Такая значимая разница может быть объяснима ошибками в представлении о запасающей функции воды в почве, описанием параметра глубины корней и оценке источника воды δ^{18} О для исследуемого района Сибири. Модель ORCHIDEE может так же переоценивать пропорцию эвапотранспирации почвы к общей эвапотранспирации вследствие высокоширотного эффекта [Daansgard, 1964]. Этот эффект описан градиентом водяного пара в следствие перемещения влаги от тропиков к полюсу, которые постепенно переходят к более обедненным значениям кислорода. Данный эффект должен быть рассмотрен при дальнейших разработках модели. Модель RLE показывает некоторое сходство с ORCHIDEE моделью (Таблица 3. 6) и показывает более строгое согласование с измеренными величинами.



Рисунок 3. 14. Линейная регрессия между RLE δ^{18} O источника воды и δ^{18} O целлюлозы. Доверительный интервал 95%.

Коэффициент регрессии ($\mathbb{R}^2 = 0,48$; p < 0,05), рассчитанный между δ^{18} О источника воды и δ^{18} О целлюлозы показывает, что 50% вариации объясняется изменением источника воды (Рисунок 3. 14).

Остальная часть вариации, скорее всего, связана с обогащением листьев кислородом, в результате испарения в ответ на изменение VPD и других физиологических параметров, в частности, устьичной реакции на изменение окружающей среды. Главным образом, изменением таких переметров как температура, влажность воздуха и δ^{18} О водяного пара.

Значимые корреляции были выявлены между RLE δ^{18} O модельными значениями источника воды и данными метеорологической станции Чокурдах для VPD июля (r = 0,80; *p* <0,01), температуры воздуха июля (r = 0,59; *p* < 0,01) и атмосферным осадкам июля (r = -0,29; *p* < 0,03) (Рисунок 3. 13). Нормированные значения средней температуры воздуха июля (+15,3°C) и VPD (0,32 кПа) для периода с 1948 г. по 2004 г. представлены на рисунке 3. 12, которые позволили выявить экстремальные периоды для температуры воздуха ($\geq 2\sigma$) и VPD июля для 1960 г. (+20°C; 0,24 kPa), 1991 г. (+21,8°C; 0.70 кПа) и 2001 г. (+21,7°C; 0,76 kPa). Для тех же самых лет δ^{13} C в древесине и целлюлозе, ширине годичных колец и имитационных данных по содержанию δ^{13} C и δ^{18} O показывают схожие значения, со среднеквадратичными отклонениями $\geq 2\sigma$ для 1960 г.; δ^{13} C в древесине (2,3 σ), δ^{13} C в целлюлозе (3 σ) для 1991 г. н. э.; δ^{13} C в древесине (2,1 σ), δ^{18} O в древесине (3,3 σ), δ^{18} O в целлюлозе (2,7 σ), а также δ^{18} O RLE (3 σ) для 2001 г. Модельные значения ширины годичных колец деревьев для BS и LPX - Вегп моделей описывались стандартным отклонением < 2 σ .

Наибольшее количество осадков согласно данным метеостанции Чокурдах было зарегистрировано в июле 1988 года (3,8 мм⁻¹, 4 σ). Влажные июльские месяцы (2 σ) наблюдались также в 1974 году (2,6 мм⁻¹) и 1976 году (2,4 мм⁻¹). Интересно отметить, что δ^{18} О в древесине и δ^{18} О ORCHIDEE показали значимые связи с температурой воздуха июля, с отклонением от среднего значения (> 1 σ) за 1988 год.

Работа Саурер с соавторами [Saurer et al., 2016] показала, что содержание δ¹⁸О в воде, выделенной из почвы в сухие годы было на 3-4 ‰ ниже по сравнению с участком многолетней мерзлоты в Туре (64° с. ш., 100° в. д.). Более сухие летние условия привели к снижению δ¹⁸О в верхнем слое почвы, что указывает на большее влияние сезонного таяния многолетней мерзлоты (или, возможно, зимней талой воды), которая, по-видимому, влияет на верхние слои почвы, когда они имеют тенденцию к высыханию.

Положительные корреляции между VPD июля и модельными значениями δ^{18} O сопровождаются уменьшением устьичной проводимости и дальнейшим увеличением обогащения δ^{18} O в источниках воды, что указывает на дефицит влаги в почве. Отрицательная корреляция с июльскими осадками была менее выражена и может быть объяснена низким количеством осадков для данного района исследования.

Кроме того, водная фракция глубины почвы по данным LPX модели значительно коррелирует с RLE δ^{18} O на глубине до 100 см., достигая более высоких значений корреляции на глубинах почв 10-20 см. (r = 0,38; *p* <0,01) и 20-30 см. (r = 0,36; *p* <0,05). На основе модели LPX - Вегп было рассчитано, что в период с 1948 г. по 2004 г. почвы оттаивали до 100 см. (Рисунок 3. 11).

Впервые представлено использование различных экофизиологических моделей для оценок δ^{13} С и δ^{18} О в древесных кольцах, которые помогли выявить влияние важных гидроклиматических факторов, таких как взаимодействие между источником воды, влажностью и глубиной оттаивания почвы, которая в значительной мере влияет на рост деревьев в условиях многолетней мерзлоты. Расхождения между модельными и измеренными данными частично связаны как с различными условиями параметризации, так же и с применением данных параметров к отдельному виду экосистем [Saurer et al., 2014]. Однако, у каждой модели есть преимущества и недостатки, но в целом, они представляют собой мощный инструмент для применения в экофизиологических исследованиях [Бенькова, Шашкин, 2003; Krinner et al., 2005; Spahni et al., 2013; Suarer et al., 2014].

Динамика влажности и температуры почвы являются доминирующими факторами при моделировании изменения δ^{13} С для зоны многолетней мерзлоты. Модельные значения δ^{13} С, полученные с использованием ORCHIDEE и BS моделей за период с 1948 г. по 2004 г. значительно коррелировали с измеренными δ^{13} С данными по древесине и целлюлозе. На основе модельных значений глубины оттаивания и фракции воды, а также реальных измерений стабильных изотопов было предположено, что лиственницы из северо-восточной части Якутии в сухие годы (1950 г., 1960 г., 1990 г.), скорее всего, имеют дополнительный доступ к влаге из почвы от талой мерзлоты, но не ниже глубины 50-70 см. (Рисунок 3. 10). Федоров-Давыдов и соавторы [Fyodorov-Davydov et al., 2009] показали, что толщина активного слоя роста деревьев в Индигирской низменности варьируется от 64 см. до 65 см. (70° 33' с.ш., 147° 26' в.д.) в период измерений с 2004 г. по 2006 г. При помощи модели LPX - Bern была имитирована водная фракция глубин почв, учитывая тот факт, что активный слой почвы для лиственничных деревьев наиболее вероятно составляет от 20 до 50 см. Дальнейшее моделирование глубины оттаивания и значений δ^{18} O с использованием модели RLE для оценки δ^{18} O источника воды указывает на дополнительное гидрологическое питание деревьев. Этот факт дает возможность предположить, что значение δ^{18} О источника воды (от -24 ‰ до -19 ‰) с 1948 г. по 1990 г. может указывать на возможный доступ лиственницы к дополнительному источнику талой воды из многолетней мерзлоты (Рисунок 3. 10). Тем не менее, остается открытым вопрос, могут ли лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr) из северо-восточной части Якутии использовать эту воду. Кроме того, RLE модель указывает на то, что июльская дождевая вода была наиболее используемым источником для периода с 1945 по 2004 гг. Модельные данные по RLE также указывают на обогащение кислорода, как источника воды и его увеличение с течением времени, возможно, из-за увеличения температуры. В результате этого более высокая эвапотранспирация из-за более высоких значений VPD приводит к водному дефициту.

1. Впервые для северо-востока Якутии получены длительные хронологии по δ¹³С и δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец лиственниц Каяндера для периода с 516 г. по 2004 г. н. э.

2. Реконструкции температуры воздуха июля и дефицита упругости водяного пара в июле, полученные по δ^{13} С в целлюлозе позволили выявить увеличение температуры $\approx 1,7^{\circ}$ С, и увеличение VPD $\approx 0,7$ мбар по сравнению с прошлым тысячелетием. Данные реконструкции свидетельствуют о том, что климат становится теплее и суше. Реконструкция, полученная по данным δ^{18} О по суммарной продолжительности солнечного сияния июля, свидетельствует о преобладании большей облачности в течение 1950-2004 гг. сопоставимой с началом средневекового периода.

3. Применение экофизиологических моделей, в сопоставлении с δ¹³C и δ¹⁸O в древесине и целлюлозе подтверждают, что деревья в течение засушливых условий могут иметь дополнительный источник почвенной влаги из талой мерзлотной воды.

4. Комбинированный подход к использованию экофизиологических моделей для оценки δ¹³C и δ¹⁸O в годичных кольцах помогает различить воздействие важных гидро-климатических факторов, таких как, взаимодействие между источником воды, почвенной влагой и глубиной сезонного оттаивания мерзлоты, влияющих на прирост деревьев лиственниц.

5. Дальнейшее применение и рассмотрение параметров годичных колец деревьев таких как: ширина годичных колец, максимальная плотность поздней древесины, анатомические параметры годичных колец и стабильные изотопы в экофизиологических моделях помогут выявить взаимодействие между деградацией мерзлоты и продуктивностью лесных экосистем в течение современного потепления.

ГЛАВА 4. Тысячелетние изменения климата и окружающей среды на востоке Таймыра

4. 1. Длительные хронологии по содержанию стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина

Впервые для востока Таймыра по данным 42-х древесных образцов получены 1494летние δ¹³С и δ¹⁸О хронологии для периода с 516 по 2009 гг. Средний возраст деревьев, использованных для анализа составлял 300 лет. Перекрытие древесных образцов между периодами составляло не менее четырех.

4. 1. 1. $\delta^{13}C$ в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина с 516 г. по 2009 г. н.э



Рисунок 4. 1. Хронология по содержанию δ^{13} С в целлюлозе с погодичным временным разрешением, построенная для периода с 516 г. по 2009 г. для востока Таймыра. Черным цветом выделена хронология, сглаженная 41-летним окном Хэмминга.

Полученная хронология четко указывает на увеличение содержания углерода в годичных кольцах с 1800-х годов (Рисунок 4. 1). Рассчитанные средние, минимальные,

максимальные значения (см. приложение Таблица 4. 1) и среднеквадратичные отклонения для всего исследуемого периода с 516 г. по 2009 г. (-24, 9‰), а в частности последних 50 лет указывает на насыщенность ¹³С в целлюлозе с максимально аномальными отклонениями для 1979 г. (+ 3, 9 σ), 1980 г. (+ 3, 9 σ) и 2009 г. (+ 3, 8 σ) от среднего значения за весь исследуемый период. Минимальное значение найдено для 1194 г. (-3 σ). Всего с отклонениями $\leq -2\sigma$ составляло 2, 2%, $\leq -1\sigma$ всего 13, 5%, $\leq +2\sigma$ несколько меньше 3, 9%, $\leq +1\sigma$ около 10, 9%.

4. 1. 2. $\delta^{18}O$ в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина с 516 г. по 2009 г. н.э.

Рассчитанные максимальные и минимальные значения позволили выявить аномальные годы относительно среднего значения (21,56 ‰) для всего исследуемого периода (516-2009 гг. н. э.). Так, аномальный год со значением максимального отклонения (+4, 2 σ) был зафиксирован по данным содержания стабильного изотопа кислорода в 923 г., в то время как минимальное значение приходилось на 1822 г., (18,2 ‰, -3,3 σ) (Рисунок 4. 2).



Рисунок 4. 2. δ^{18} О хронология, построенная для периода с 516 г. по 2009 г. н.э. для востока Таймыра. Хронология, сглаженна 41-летним окном Хэмминга и выделена голубым цветом. Репликация деревьев (шт.) представлена для всего исследуемого периода.

Рассчитанные значения среднеквадратичные отклонения $\leq -2 \sigma$ составляли 2,8 % от всего исследуемого периода, $\leq -1 \sigma - 14 \%$, $\leq +2 \sigma - 1,3 \%$, $\leq +1\sigma - 16$, 2% (Приложение, Таблица 4.2).

4. 2. Климатические факторы, оказывающие влияние на изменение соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода

Статистический анализ, проведенный между данными, полученными по содержанию стабильных изотопов углерода и кислорода и среднемесячными климатическими данными метеостанции Хатанга (Таблица 2. 1) показали:

 отрицательно значимые корреляции между осадками июля и содержанием δ¹³C в целлюлозе годичных колец для периода с 1966 по 2009 гг. (r=-0,37; *p*<0.01).

 положительно значимые корреляции между данными индекса арктических коллебаний мая с данными по содержанию δ¹⁸O в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина. На основе выявленных статистически значимых связей далее применен линейный регрессионный анализ и выполнены климатические реконструкции.

4. 3. Реконструкция осадков июля по соотношению стабильных изотопов углерода в целлюлозе годичных колец

Одномерный линейный регрессионный анализ был применен между δ¹³С в целлюлозе и осадками июля для калибровочного и верификационного периодов.

Весь объем сопоставимой информации для имеющихся метеорологических данных разбивался на две равные части, одна из которых использовалась для построения статистической модели (калибровочные данные), а вторая – для проверки качества работы полученной статистической модели. Статистическая достоверность регрессионных моделей реконструкций была подтверждена калибровкой и верификацией (Таблица 4. 1).

Калибровоч	Верификационный период							
Период	R	R ²	F-критерий	DW	Период	R	R ²	Kc
1966-2009	-0,37	0,13	6,47 df=1,42 <i>p</i> <0,0001	1,95				
1966-1980	-0,49	0,24	5,69 df=1,18 <i>p</i> <0,0001	2,19	1980-2000	-0,54	0,29	0,60
1980-2000	-0,54	0,29	4,97 df=1,12 <i>p</i> <0,0001	2,63	1966-1980	-0,49	0,24	0,70

Таблица 4. 1. Модели реконструкции климатических показателей.

Статистические связи оказались устойчивыми на рассматриваемых интервалах и позволили получить одномерное регрессионное уравнение, применяемое на весь период исследования.

Реконструкция осадков июля =
$$(-357,791+(-16,723\bullet\delta^{13}C))+0,151331$$
 (4. 1)

В результате применения уравнения (4. 1) к данным по содержанию углерода в целлюлозе годичных колец деревьев лиственницы Гмелина получена реконструкция осадков июля для периода с 516 г. по 2009 г. н. э (Рисунок 4. 3.).



Рисунок 4. 3. Реконструкция атмосферных осадков июля для периода с 516 г. по 2009 г. н. э. для востока Таймыра.

Из рисунка 4. 3 можно видеть значимое снижение количества осадков с 1800-х годов, что свидетельствует о засушливых условиях. Более влажными периодами являлись IX, XI-XII века. По данным ширины годичных колец деревьев [Naurzbaev et al., 2002; Сидорова, 2003] данные периоды, характеризовались теплыми и благоприятными условиями для произрастания деревьев в данном районе исследований.

4. 4. Реконструкция климатического индекса арктической циркуляции мая по данным $\delta^{18}O$ в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина для восточной части Таймырского Полуострова

Рассчитанные линейные регрессионные уравнения на базе достоверных статистических значений (Таблица 4. 2) позволили применить уравнение (4. 2) для реконструкции арктической осцилляции (АО) мая для всего исследуемого периода.

Реконструкция AO=(-8,91299+(0,40898• δ^{18} O))+0,0142277 (4. 2)

Таблица 4. 2. Модели реконструкции климатических показателей и δ^{18} О в целлюлозе годичных колец лиственницы Гмелина для калибровочного и верификационного периодов.

Калибровочный период					Верифика	ационнь	ый пери	од
Период	R	\mathbb{R}^2	F-критерий	DW	Период	R	\mathbb{R}^2	Kc
1969-2009	0,46	0,21	10,40 df=1,39 <i>p</i> <0,001	2,13				
1969-1990	0,42	0,18	4,42 df=1,20 <i>p</i> <0,004	1,98	1990-2009	0,51	0,26	0,90
1990-2009	0,51	0,26	6,31 df=1,18 <i>p</i> <0,002	2,11	1969-1990	0,42	0,18	0,85

Негативные фазы арктических колебаний влекут за собой увеличение осадков, в то время как положительные фазы приводят к снижению осадков и засушливым условиям в данном районе исследования. Интересен тот факт, что, основываясь на реконструированных

данных, IX-X века характеризовались более сухими условиями мая, по сравнению с современным периодом (Рисунок 4. 4).



Рисунок 4. 4. Реконструкция арктических колебаний мая для периода с 516 по 2009 гг. н. э. для восточной части Таймырского Полуострова.

4. 5. Выводы к главе 4

1. Впервые, по данным 42-х древесных образцов получены 1494-летние хронологии по содержанию δ¹³С и δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец лиственниц Гмелина, для периода с 516 по 2009 гг. н.э., произрастающие на востоке Таймыра.

2. Выявлено, что δ¹³С в целлюлозе содержит информацию об изменении осадков июля. По данным реконструкции осадков июля обнаружено, что для периода с 1950 г. по 2009 г. произошло снижение осадков на 25 мм., относительно периода с 516 г. по 1949 г. Однако, для периода с 1950 г. по 2009 г. относительно пред-индустриального периода с 1900 г. по 1949 г. снижение осадков составляло ≈ 8 мм. Аномально сухими годами за последние 1494 года по данным реконструкции осадков июля были 923 г. и 1979 г. н.э. Аномально влажными были 1113 г. и 1822 г.

3. Основываясь на реконструированных данных индекса арктических колебаний мая, полученным по содержанию кислорода в целлюлозе годичных колец выявлено, что IX-X века характеризовались более сухими условиями мая, по сравнению с современным периодом.

ГЛАВА 5. Изменения климата и окружающей среды в Алтае-Саянской Горной стране

5. 1. Длительные хронологии по содержанию углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской

Впервые для района Монгун тайга, получены хронологии по содержанию углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской для периода с 520 г. по 2016 г. н.э. Для построения хронологий были использованы 42 древесных образца, которые были так же включены в ранее построенную длительную древесно-кольцевую хронологию по ширине годичных колец [Мыглан и др., 2009]. Средний возраст деревьев, использованных для анализа составлял 350 лет. Перекрытие между периодами составляло не менее четырех древесных образцов. Ранее по данным ширины годичных колец деревьев было выявлено, что температура воздуха июня-июля играет важную роль для роста деревьев лиственниц в данном районе исследования [Мыглан и др., 2009], а температура июля-августа оказывает значимое влияние на формирование максимальной плотности поздней древесины годичных колец деревьев [Büntgen et al., 2016].

5. 1. 1. $\delta^{13}C$ в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской с 520 г. по 2016 г. н. э.

Хронология по содержанию углерода (Рисунок 5. 1) указывает на увеличение тренда в течение современного периода и показывает значимую вариацию в течение всего исследуемого периода.

Для периода с 520 г. по 2016 г. были рассчитаны средние значения для δ^{13} С, (-22,04 ‰), максимальное значение было найдено для 2016 г. (-19,6 ‰; +3.2 σ), а минимальное для 686 года (-24,7‰, -3,6 σ). Менее 1% было найдено значений со среднеквадратическим отклонением \leq -3 σ относительно всей длины ряда; ~ 1,5 % для (\leq -2 σ) и больше всего ~ 15,3 % для \leq -1 σ . Для положительных отклонений с \leq +3 σ ~0,07 %; \leq +2 σ ~ 1,8 %; \leq +1 σ ~ 16,5 % (см. приложение, Таблица 3.5).



Рисунок 5. 1. δ¹³C хронология с погодичным временным разрешением, построенная для периода с 520 г. по 2016 г. н. э. для района Монгун тайга. Хронология, сглаженна 41-летним окном Хэмминга и выделена белым цветом.

5. 1. 2. $\delta^{18}O$ в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской с 520 г. по 2016 г. н. э.

Экстремальное положительное значение для всего исследуемого периода было найдено только для 2008 г. (32,2 ‰; +4,4 σ), а минимальное значение - для 536 года (19,9 ‰, -6,3 σ).



Рисунок 5. 2. δ^{18} О хронология с погодичным временным разрешением, построенная для периода с 520 г. по 2016 г. для района Монгун тайга. Хронология, сглажена 41-летним окном Хэмминга и выделена красным цветом.

Всего было найдено менее 1% значений со среднеквадратичным отклонением (\leq -3 σ), ~ 2,07 % (\leq -2 σ), ~ 13% (\leq -1 σ), ~ 0,73 % (\leq +3 σ), ~ 1,74 % (\leq +2 σ), ~ 11 % (\leq +1 σ) (см. Приложение, Таблица 3.6).

5. 2. Климатические факторы, оказывающие влияние на изменение соотношения стабильных изотопов кислорода и углерода

Статистический анализ, проведенный между данными, полученными по содержанию стабильных изотопов углерода и кислорода и среднемесячными климатическими данными метеостанции Мугур-Аксы и Кош- Агач (Таблица 2. 1) показали:

1) Отрицательно значимые корреляции между осадками июля и содержанием δ^{13} С в целлюлозе для периода с 1966 по 2004 гг., (r=-0,58; *p*<0.01).

 Положительно значимые корреляции между содержанием δ¹⁸O в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской и

а) дефицитом упругости водяного пара (VPD) в июне

б) температурой воздуха июля

с) суммарной продолжительностью солнечного сияния в июле.

На основе выявленных статистически значимых связей далее был применен линейный регрессионный анализ и получены климатические реконструкции для данного района исследования.

5.3. Климатические реконструкции по $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в целлюлозе годичных колец

5. 3. 1. Реконструкция осадков июля

Статистические значения для периодов калибровки и верификации, рассчитанные на базе линейного регрессионного уравнения (5. 1) между данными по осадкам июля и содержанием углерода в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской для района Монгун-тайга представлены в Таблице 5.1.

Реконструкция осадков июля =
$$(-762,875+(-38,470 \bullet \delta^{13}C))+0,135949$$
 (5. 1)

Калибровочный период					Верификационный период			
Период	R	\mathbb{R}^2	F-критерий	DW	Период	R	\mathbb{R}^2	Kc
1966-2004	-0,58	0,34	18,11 df=1,36 <i>p</i> <0,001	1,84				
1966-1985	-0,38	0,15	4,85 df=1,28 <i>p</i> <0,001	1,75	1985-2004	0,48	0,23	0,53
1985-2004	-0,50	0,25	9,03 df=1,27 <i>p</i> <0,001	1,93	1966-1985	0,68	0,46	0,57

Таблица 5. 1. Статистические значения для периодов калибровки и верификации.



Рисунок 5. 3. Реконструкция атмосферных осадков июля для периода с 520 г. по 2004 г. по данным содержания углерода в целлюлозе годичных колец лиственницы.

Низкое количество осадков июля по данным реконструкции (Рисунок 5. 3), основанной на содержании углерода в целлюлозе годичных колец отмечается в течение IX-XI, XIII, XIV, XVIII-XXI веков. Влажные периоды выявлены в течение VII, XII, XV, XVII веков.

5. 3. 2. Реконструкция дефицита упругости водяного пара в июне

Уравнение для реконструкции дефицита упругости водяного пара в июне (5. 2) было получено на основе значимых регрессионных связей для периодов калибровки и верификации (Таблица 5. 2).

Калибровочный период					Верификационный период				
Период	R	\mathbb{R}^2	F-критерий	DW	Период	R	R ²	Kc	
1950-2008	0,59	0,35	29,8 df=1,55 <i>p</i> <0,001	1,17					
1950-1985	0,35	0,12	4,4 df=1,32 <i>p</i> <0,001	1,68	1985-2008	0,54	0,29	0,27	
1985-2008	0,54	0,29	9,14 df=1,22 <i>p</i> <0,001	0,80	1950-1985	0,35	0,12	0,61	

Таблица 5. 2. Статистические значения для периодов калибровки и верификации.

Реконструкция VPD = $(-0,415327 + (0,295111 \cdot \delta^{18}O)) + 0,108585$ (5.2)



Рисунок 5. 4. Реконструкция дефицита упругости водяного пара в июне для периода с 520 г. по 2008 г. по данным содержания кислорода в целлюлозе годичных колец лиственницы.

Минимальное значение VPD выявлено для 536 г. н. э., а максимальные значения для 1267 г. и 2008 г.

5. 3. 3. Реконструкция температуры воздуха июля

Реконструкция температуры воздуха июля (Рисунок 5. 5) получена по расчетному линейному регрессионному уравнению (5. 3) на базе достоверных статистических связей для калибровочного и верификационного периодов (Таблица 5. 3).

Таблица 5. 3. Статистические значения для периодов калибровки и верификации.

Калибровоч	ровочный период Верификацион					ионный	перио,	д
Период	R	\mathbb{R}^2	F-критерий	DW	Период	R	\mathbb{R}^2	Kc
1963-2015	0,64	0,40	33,84 df=1,51	1,79				
			<i>p<0,001</i>					
1963-1989	0,40	0,16	4,85 df=1,25	1,72	1989-2015	0,43	0,18	0,44
			<i>p<0,001</i>					
1989-2015	0,43	0,18	5,70 df=1,25;	2,25	1963-1989	0,40	0,16	0,40
			<i>p<0,001</i>					

Реконструкция температуры июля = $(2,615630+(0,410140 \cdot \delta^{18}O))+0,108564$ (5.3)



Рисунок 5. 5. Реконструкция температуры воздуха июля для периода с 520 г. по 2015 г. по данным содержания кислорода в целлюлозе годичных колец лиственницы.

5. 3. 4 Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния в июле

Рассчитанные коэффициенты регрессионного уравнения (5. 4) и проверка модели на разных периодах калибровки и верификации (Таблица 5. 4) позволили получить реконструкцию по продолжительности солнечного сияния в июле для периода с 520 г. по 2016 г., базируясь на ежемесячных метеорологических данных для периода 1968-2016 гг.

Таблица 5. 4. Статистические значения для периодов калибровки и верификации.

Калибровочный период					Верификационный период			
Период	R	\mathbb{R}^2	F-критерий	DW	Период	R	R ²	Kc
1968-2016	0,34	0,11	6,10; df=1,47	1,40				
			<i>p<0,01</i>					
1968-1991	0,62	0,38	13,32; df=1,22	1,10	1991-2016	0,42	0,18	0,66
			<i>p<0,001</i>					
1991-2016	0,42	0,18	5,3; df=1,24	1,97	1968-1991	0,62	0,38	0,47
			<i>p<0,01</i>					

Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния для июля =



= $(183,4394+(4,0804 \cdot \delta^{18}O))+0,137225$ (5.4)

Рисунок 5. 6. Реконструкция суммарной продолжительности солнечного сияния в июле, полученная по содержанию δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец лиственниц.

Низкая продолжительность солнечного сияния выявлена для 536 г.н.э., а наиболее высокая для средневекового (800-1060 гг.) и современного (900-2004 гг.) периодов.

5.4. Выводы к главе 5

1. Впервые для периода с 520 г. по 2016 г. получены хронологии по содержанию стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской, произрастающих в районе Монгун тайга, Республика Алтай.

2. По данным содержания углерода в целлюлозе годичных колец лиственницы получена реконструкция атмосферных осадков июля для периода с 520 по 2004 гг. Полученные результаты свидетельствуют о засушливых периодах в течение IX-XI, XIII, XIV, XVIII-XXI вв. Влажные периоды выявлены в течение VII, XII, XV, XVII вв.

3. По данным содержания кислорода в целлюлозе годичных колец лиственницы получены реконструкции по дефициту упругости водяного пара в июне, температуре воздуха и продолжительности солнечного сияния в июле. Применение анализа стабильных изотопов позволило выявить, что аномально холодные периоды VI в. н. э., характеризовались засушливыми условиями и уменьшением суммарной продолжительности солнечного сияния. Однако, период современного потепления (XX-XXI вв.) характеризуется как теплый, засушливый и солнечный, подобно периоду средневекового потепления (X-XI вв.).

ГЛАВА 6. Эффективность использования воды хвойными в течение последнего тысячелетия

Содержание углекислоты в атмосфере (CO₂) является одним из наиболее важных парниковых газов вследствие его продолжительного времени пребывания в атмосфере [IPCC, 2007]. Накопление концентрации CO₂ в атмосфере растет при повышении средней глобальной температуры воздуха [IPCC, 2007; Mann et al., 2008], что является актуальным и важным аспектом для изучения экофизиологического отклика деревьев на данные изменения. В целом, растения реагируют на повышение СО₂ с увеличением скорости фотосинтеза [Farquhar et al., 1982, 1989], что приводит к увеличению производства биомассы, в то время как устьичная проводимость снижается, уменьшая потерю воды растениями. Существует большой объем литературы, подтверждающий эти результаты, основанные на лабораторных экспериментах. Исследования Саге и соавторов [Sage et al., 1989], однако, показали, что через определенное время после воздействия углекислоты на деревья начинает происходить снижение фотосинтеза. Время отклика и степень изменения скорости регулирования зависят от вида древесных растений и могут варьироваться в значительной степени. В то время как краткосрочный ответ на повышенное содержание СО₂ показывает вышеупомянутые закономерности для большинства исследуемых растений. Однако, существует неопределенность В отношении долгосрочных эффектов, поскольку лабораторные и полевые экспериментальные данные часто противоречат друг другу. Экспериментальные исследования, полученные в результате воздействия СО₂ на растения, показали увеличение фотосинтеза и биомассы [Stitt, Krapp, 2006], в то время как в других исследованиях влияния углекислоты очень мало или вообще не было выявлено [Körner et al., 2005; Streit et al., 2014]. Как растения в естественных экосистемах реагируют в долгосрочной перспективе на повышенный уровень СО2, в значительной степени зависит от условий окружающей среды, таких как доступность воды и питательных веществ, а также, температурного режима [Vaganov et al., 2006; Körner, 2012].

С помощью стабильных изотопов можно определить влияние климатических параметров, таких как влажность воздуха, температуры и доступности воды для растений [Siegwolf, Saurer 2007]. Кроме того, по соотношению изотопов углерода в годичных кольцах

деревьев, возможно выявить влияние увеличения CO₂ на эффективность использования воды (iWUE) растениями [Saurer et al., 2004; Siegwolf, Saurer 2007]. В большинстве исследований описывается значительное увеличение iWUE за последние 150 лет [Saurer et al., 2004, 2016; Frank et al., 2015]. Так, для деревьев Picea abies, растущих в умеренной зоне, было обнаружено увеличение iWUE более чем на 50%. Эта вариация частично зависит от вида или зависит от местного климата, воды и питательных веществ [Jaggi et al., 2003]. Изменение iWUE вместе с повышением концентрации CO₂ было обнаружено для деревьев лиственниц, произрастающих на севере Сибири [Сидорова и др., 2008]. Тем не менее следует принимать во внимание внутреннюю эффективность использования воды, которая является функцией устьичной проводимости и связи с фотосинтезом. Сейбт с соавторами [Seibt et al., 2008] показали, что iWUE, связанная с мгновенными газообменами или производствами биомассы, не является одинаковой, и не дает тех же значений, что и во внутреннем iWUE, условий дыхания, где пост-синтетические процессы не рассматриваются. Поскольку лесные экосистемы из высокоширотных и высокогоных районов особенно чувствительны к изменениям температуры, дефициту влаги и питательным веществам, они являются идеальными индикаторами изменений окружающей среды И районами ДЛЯ дендрохронологических, биогеохимических и экофизиологических исследований [Vaganov et al., 2006; Sidorova et al., 2008, 2010, 2012; Körner et al., 2012]. Таким образом, деревья из этих регионов являются идеальными архивами, позволяющими ежегодно обновлять ретроспективные условия окружающей среды.

В данной главе рассмотрим изменение соотношения изотопов углерода в целлюлозе годичных колец деревьев за последние тысячелетие, и более детально, последнее столетие для высокоширотных и высокогорных районов Евразии с целью выявления эффективности использования воды (iWUE) деревьями в меняющихся условиях окружающей среды и воздействия климата, в результате увеличения CO₂ и изменения температуры. Основная гипотеза заключается в том, что увеличение iWUE происходит в результате увеличения CO₂, независимо от местных климатических условий, как это предполагалось раньше [Jaggi et al., 2003]. Воздействие климата, доступность воды и питательных веществ только модулируется WUEi, но сама по себе функция отклика не меняется. Реально измеренные значения δ^{13} С в

целлюлозе годичных колец будут сопоставлены для XX века с модельными данными LPX - Вегп и модели наземной биосферы (CLM4.5) (см. Глава 2).





Рисунок 6. 1. Эффективность использования воды (iWUE) хвойными деревьями (а-д), а так
же рассчитанное соотношение реконструированных данных по внутреннему (c_i) и внешнему (c_a) содержанию CO₂ (и-к) по данным δ^{13} C в целлюлозе годичных колец лиственниц для северо-востока Якутии (YAK) и востока Таймыра (TAY) [Churakova (Sidorova) et al., 2018], в сопоставлении с хронологиями, полученными по сосне для Торнетраск (Швеция, SWE) [Loader et al., 2013], Форфьерд (северо-запада Норвегии, NOR) [Young et al., 2012], и Квибек тайга (Канада, CAN) [Gennaretti et al., 2017] (Таблица 2. 1, Глава 2).

Для выявления эффективности использования воды хвойными деревьями были рассмотрены тысячелетние хронологии, рассчитанные по содержанию δ^{13} С в целлюлозе годичных колец хвойных (Рисунок 6. 1). Выявлено, что эффективность использования воды хвойными стремительно увеличивается с 1900-х г, в то время как внутреннее и внешнее содержание концентрации углекислоты внутри листа непрерывно уменьшается.

Наряду с различиями в экофизиологическом отклике хвойных деревьев, произрастающих в субарктических районах Евразии выявлены общие колебания с XV по XVII века н.э. и современного периода, характеризующиеся значительным увеличением использования воды, что свидетельствует о засушливых условиях в данные века (Рисунок 6. 2).



Рисунок 6. 2. Эффективность использования воды хвойными деревьями из субарктических районов Евразии. Хронологии сглажены 51-летним окном Хэмминга.

Рассчитанная эффективность использования воды хвойными вдоль высокоширотного трансекта (Рисунок 6. 3), полученная по данным содержания δ^{13} С в целлюлозе для северовостока Якутии (YAK) [Sidorova et al., 2008; Сидорова и др., 2010]; востока Таймыра (TAY) [Sidorova et al., 2010, 2013]; Кольского полуострова (KOL) по данным Татьяны Бетгер (UFZ, Германия), [Kremenski et al., 2004]; Лаанила (Лапландия, Финляндия, LAN) [Gagen et al., 2012]; Торнетраск (Швеция, SWE) [Loader et al., 2013] и Квибек тайга (Канада, CAN) [Gennaretti et al., 2017] отчетливо показывает увеличение использования воды хвойными деревьями, которое пропорционально увеличению углекислоты в атмосфере. Наибольшее увеличение iWUE выявлено для деревьев, произрастающих в Канаде, в восточной части Таймырского полуострова и на северо-востоке Якутии. В то время как в западной части высокоширотного трансекта (Хибины, Кольский полуостров; Лаанила, Финляндия; и Торнетраск, Швеция iWUE схожи в динамике, за исключением 1920-1950-х годов, где эффективность использования воды сосной в Лапландии (розовая линия) возросла по сравнению с другими западными районами, и была сопоставима с динамикой iWUE на востоке Таймыра (красная линия).

Значительное снижение внутреннего (с*i*) содержания CO₂ к внешнему (с*a*) выявлено для востока Таймыра, Квибек тайги, северо-востока Якутии (Рисунок 6. 4). Однако, значительные увеличения iWUE, например, для Европейских районов Саурер и др. [Saurer et al., 2016] были проинтерпретированы как результат комбинированного эффекта: увеличения CO₂, повышения температуры и уменьшение осадков, ведущими к дефициту влаги в почве.

Основываясь на климатических реконструкциях, полученных для северо-востока Якутии (Глава 3), востоку Таймыра (Глава 4) период с 1950 по 2000 гг., характеризуется засушливыми условиями, что отражается на увеличении iWUE.



Рисунок 6. 3. Эффективность использования воды хвойными деревьями вдоль трансекта высоких широт.



Рисунок 6. 4. Соотношение внутреннего (*c_i*) к внешнему (*c_a*) содержанию атмосферного CO₂ в листе для хронологий вдоль трансекта высоких широт.

6. 2. Сибирский трансект

Наибольший рост iWUE выявлен для самого южного района Сибирского трансекта – Хакасии [Knorre et al., 2010], преимущественно после 2000 года (Рисунок 6. 5). В то время, как деревья лиственницы из северных районов Туры [Sidorova et al., 2009] и Енисейска [Knorre et al., 2018] показывают линейное увеличение, по сравнению с экспоненциальным ростом iWUE для южного и сухого района Хакасии.



Рисунок 6. 5. Эффективность использования воды хвойными вдоль Сибирского трансекта.



Рисунок 6. 6. Соотношение внутреннего (*c_i*) к внешнему (*c_a*) содержанию атмосферного CO₂ в листе для районов исследования Сибирского трансекта.

Научная работа Кнорре и соавторов [Кпогге et al. 2010] показала, что в степном районе Хакасии происходит увеличение вегетационного периода, в следствие роста температуры и уменьшения осадков с 1980-х г. Данные климатические изменения привели к засушливым условиям в рассматриваемом районе исследования, и как следствие увеличению дефицита влажности, уменьшению устьичной проводимости и росту iWUE (Рисунок 6. 5, 6. 6).





Рисунок 6. 7. Реконструированная эффективность использования воды деревьями (iWUE, левая панель) и соотношения внутреннего (c_i) к внешнему (c_a) содержанию CO₂ $(c_i/c_a,$ правая

панель) для высокогорных районов Монгун тайга, Алтая [Sidorova et al., 2011, 2012] (а, д), Летченталя, Швейцарских Альп [Kress et al., 2014] (б, е), Шемплон, Швейцарского Национального Парка [Churakova (Sidorova) et al., 2016а] (в, ж) и Моор, Пакистана [Treydte et al., 2007, 2009] (г, з).

Для выявления изменения iWUE и соотношения внутреннего и внешнего содержания CO_2 для высокогорных районов были проанализированы хронологии по содержанию $\delta^{13}C$ в целлюлозе годичных колец хвойных для высокогорных районов (Рисунок 6. 7).

Соотношение c_i/c_a уменьшается для хронологий (Рисунок 6. 7 д, е) с ярко выраженным снижением в ответ на увеличение углекислоты в атмосфере, в отличие от хронологий по Швейцарским Альпам (Рисунок 6. 7 ж, з). Однако, интересен тот факт, что c_i/c_a начинает увеличиваться с 1990-х для Каракорум (Пакистан, РАК), свидетельствуя об адаптации деревьев к меняющимся условиям окружающей среды.



Рисунок 6. 8. Реконструкции эффективности использования воды хвойными деревьями для высокогорных районов: Монгун тайга, Алтай (красная линия); Летченталь и Шемплон, Швейцария (черная и голубая линии, соответственно) и Моор, Пакистан (зеленая линия). Хронологии сглажены 51-летним окном Хэмминга.

Все хронологии (Рисунок 6. 8) показывают увеличение использования воды после 1900-х г. Более подробно рассмотрим последнее столетие (Рисунок 6. 9).



Рисунок 6. 9. Эффективность использования воды хвойными для высокогорных районов Евразии. Ссылки на первоисточник данных см. Глава 2, Таблица 2. 1.



Рисунок 6. 10. Соотношение внутреннего (*c_i*) к внешнему (*c_a*) содержанию атмосферного СО₂ для высокогорных районов Евразии.

Из рисунка 6. 9. можно отчетливо видеть, что наибольшее использование воды деревьями найдено для Каракорум (Пакистан, РАК), который характеризуется более сухими условиями по сравнению с районами Монгун тайга, Алтай и Летченталь, Швейцария. Значительные тренды для iWUE наблюдаются после 1960-х годов, с увеличением CO₂ в атмосфере.

Снижение соотношения c_i/c_a (Рисунок 6. 10) найдено для Алтая [Sidorova et al., 2012] и Швейцарских Альп [Kress et al., 2010], которые наиболее близки по видам деревьев и условиям произрастания. В то время как для района исследования Моор, Пакистана [Treydte et al., 2007] наблюдаются относительно постоянные значения для c_i/c_a с небольшим снижением после 1960-х.

6. 4. Эффективность использования воды деревьями в XX веке: оценка на основе измеренных и модельных данных

Анализ хронологий по соотношению стабильных изотопов углерода (¹³C/¹²C) в годичных кольцах деревьев, открывает новые возможности для оценки механизмов изменения фотосинтеза и устьичной проводимости на изменение климата, в частности изменения содержания углекислоты В атмосфере в сочетании c имитацией биогеохимических моделей, в основе которых лежат экофизиологические и механические процессы. Дискриминация изотопов углерода указывает на соотношение парциального давления CO₂ в межклеточных пространствах (c_i) и атмосфере (c_a), а также соотношения ассимиляции к устьичной проводимости, что называется эффективностью использования воды (iWUE) (см. Глава 2, раздел 2. 6).

Моделирование изотопов углерода было проведено для современного периода с использованием модели наземной биосферы (LPX - Bern) и динамической модели глобальной растительности CLM 4. 5. Описание моделей более подробно изложено в методическом разделе 2. 8. 1, Глава 2).

76 хронологий по содержанию δ¹³С в целлюлозе годичных колец хвойных, в основном из Европы, бореальной Азии, Сибири и западной части Северной Америки (Приложение: Таблица 6.1), предполагает, что в среднем, небольшие изменения в дискриминации изотопов

произошли в двадцатом веке, что привело к увеличению iWUE примерно на 27% с 1900 года [Keller et al., 2017] (Рисунок 6. 11).

Результаты LPX - Вегп модели соответствуют измеренным данным, полученным по 76 δ^{13} С хронологиям в целлюлозе годичных колец в течение XX века, поддерживая идею о том, что физиология устьиц адаптировалась для оптимизации процесса между накоплением углерода путем ассимиляции и потери воды. Напротив, CLM 4.5 имитирует увеличение дискриминации и, в свою очередь, изменение iWUE, которое почти в два раза больше, чем выявлено по измеренным данным в годичных кольцах деревьев (Рисунок 6. 11).



Рисунок 6. 11. Изменения дискриминации (ΔΔi) и ΔiWUE: δ¹³С в годичных кольцах деревьев (черный/серый) относительно CLM 4.5 (синий) и LPX - Bern (красный).

Факториальное моделирование показывает, что эти изменения в основном связаны с увеличением атмосферного CO₂. Результаты показывают, что понижающая регуляция c_i / c_a и фотосинтеза в условиях лимитированных значений по азоту, возможно, вследствие параметризации CLM 4.5, или в связи с другими возможно, более фундаментальными

проблемами, связанными с предписанной зависимостью между устьичной проводимостью и ассимиляцией [Bonan et al., 2014; Ghimire et al., 2016]. Внутреннее парциальное давление в листе завышено при параметризации в CLM 4.5. Факториальное моделирование показывает, что в этих завышенных тенденциях преобладает реакция CLM 4.5 на увеличение CO₂, а не реакции на изменения климата. Во-первых, азотная регуляция фотосинтеза и проводимости происходит в модели на почасовой временной стадии. Хотя не представляется правдоподобным, что листовые структуры так быстро регулируются. Во-вторых, завышена связь между ассимиляцией углерода и предписанной транспирацией воды. В CLM 4.5 фотосинтез регулируется ограниченной доступностью азота (см. Глава 2), что может привести к усвоению высокой ассимиляции. В работе Рачка и др. [Raczka et al., 2016] применялась повторная калибровка CLM4.5 (Niwot Ridge, CША) при имитации с ограничением азота и без него. Эти авторы показывают, что снижение регуляции ассимиляции сильно влияет на изменение среднего соотношения c_i/c_a для XX века.

Гимир и соавторы [Ghimire et al., 2016] осуществили альтернативную формулировку для параметризации азота, в частности ограничение в CLM 4.5 модели, доступность азота, которая влияет на максимальную скорость фотосинтеза на разных временных интервалах с незначительными изменениями c_i/c_a путем изменения отношения углерода к азоту на уровне листа. Это уменьшает смещение глобальной первичной продукции, индекса площади листа и биомассы, улучшая прогнозы эффективности использования воды по сравнению с исходной формулировкой CLM4.5. Другая возможность несогласованности модельных данных с измерениями заключается в том, что формулировка фотосинтеза в CLM4.5 может быть недостаточной для представления связи между устьичной проводимостью и ассимиляцией.

Как показано на рисунке 6. 11, моделируемые изменения в дискриминации являются положительными для некоторых районов Южной Америки и Юго-Восточной Австралии и, таким образом, противоположны всемирной тенденции, моделируемой при использовании CLM4.5. Для вековых тенденций это говорит о том, что ассимиляция смещается во времени с более низкой относительной влажностью, когда дискриминация уменьшается и относительное увеличение iWUE больше относительного увеличения CO₂. Такое уменьшение моделируется в большинстве случаев по CLM4.5 (Рисунок 6. 11). Дуарте и др.

118

[Duarte et al., 2016] и Рачка и др. [Raczka et al., 2016] перекалибровали CLM4.5 в соответствии с условиями конкретного участка в хвойном лесу Северо-западной части США, Нивот, штат Колорадо. Эти исследования выявили существенные увеличения доли дискриминации для XX века. Можно ожидать, что из уравнения для определения iWUE (см. Глава 2), изменение параметра наклона приведет к пропорциональному изменению абсолютной величины iWUE и соответствующему изменению в дискриминации. Структура модели CLM4.5 допускает как положительные, так и отрицательные изменения в дискриминации при повышении CO₂ и c_i/c_a , а также предполагает линейную зависимость при постоянных значениях CO₂ и относительной влажности.

Изменения в моделируемой дискриминации изотопов в соответствии с измеренными значениями углерода предполагает, что такая процедура оптимизации может быть предпочтительной, по сравнению с фиксированными значениями ассимиляции и устьичной проводимости, как в CLM4.5. Новая модель фотосинтеза, предложенная Прентис и Ванг с соавторами [Prentice et al., 2014; Wang et al., 2016] предполагают гипотезу об эволюционной оптимизации и используют информацию о пространственном градиенте в соотношении изотопов углерода. В совокупности, совпадение между модельными и измеренными значениями в области дискриминации, могут быть улучшены в будущем путем корректировки параметров модели, таких как параметр наклона. Леонарди и соавторы [Leonardi et al., 2012] утверждают, что временная вариация δ^{13} С в их длительных хронологиях для деревьев из 53 районов исследования из разных частей земного шара поддерживает гипотезу об активном растительном механизме, который поддерживает постоянное соотношение между концентрациями СО2 в межклеточным и окружающем пространстве. Левеский и соавторы [Lévesque et al., 2014] сообщили об увеличении iWUE за последние 50 лет в диапазоне от 8 до 29% для районов Швейцарских Альп, характеризующихся засушливыми условиями, которые воздействуют на уменьшение транспирации за счет снижения потребления углерода и роста. Исследование Чураковой (Сидоровой) с соавторами [Churakova (Sidorova) et al., 2016а) сообщает о различных стратегиях iWUE с относительно постоянными значениями c_i/c_a для европейской лиственницы (Larix decidua), начиная с 1990-х годов, с непрерывно увеличивающимися значениями iWUE для горных сосен (*Pinus mugo*) с 1980-х годов в Швейцарском

Национальном парке. Лью с соавторами [Liu et al., 2014] указывают на умеренные изменения в увеличении iWUE на 36% в прибрежном лесе северо-западного Китая с 1920 по 2012 гг. Воелкер с соавторами [Voelker et al., 2016] проанализировали δ^{13} С и дискриминации в древесных покрыто и голосеменных видах, значения которых увеличивались по всему диапазону СО₂, охватывая не менее 100 (ппм.). Авторы заключили, что деревья реагируют на увеличение CO₂ регулируя газообмен внутри листа, что минимизирует потерю воды для заданного количества углерода и, следовательно, сводит к минимуму вероятность воздействия засухи. В работе Кляйн и соавторы [Klein et al., 2016] обнаружили, что iWUE увеличилась на 38% на уровне хвои, в результате ассимиляции при постоянной устьичной проводимости. Интересно, что Кляйн и соавторы [Klein et al., 2016] не смогли определить увеличение запасов углерода в деревьях, что соответствует увеличению уровня ассимиляции, и вследствие этого, природа дополнительно усвоенного углерода остается неясной. Увеличение iWUE на 38% сопоставимо с увеличением CO₂ (400 ппм). Напротив, Баттипаглия и соавторы [Battipaglia et al., 2013] сообщают об увеличении iWUE между 50 и 90% для некоторых Европейских участков (EUROFACE), что вероятно, поддерживается постоянным содержанием δ^{13} С и снижается при повышенном CO₂. Кеенан и соавторы [Keenan et al., 2013], сообщают, что при увеличении CO₂ также значимо увеличивается эффективность использования воды, суммируя результаты измерений ковариации примерно для 20 районов исследования, включающие умеренные и бореальные лесные участки в Северном полушарии. Однако, на эти районы исследования могут быть оказаны локальные условия, которые не являются представительными для уровня региональных или глобальных масштабов.

Пространственные градиенты для распознавания деревьев, моделируемых CLM4.5 и LPX - Bern, оцениваются с использованием содержания углерода в листе [Cornwell et al., 2016]. Обе модели обоснованно представляют распределение на основе дискриминации углерода, хотя модельная дискриминация в среднем слишком мала по сравнению с измерениями, в частности для засушливых регионов. Низкая дискриминация в засушливых регионах может быть вызвана несоответствием по шкале между локальными условиями участка и средними значениями грид-сетки.

Глобальная усредненная ассимиляция δ^{13} С для глобальной первичной продукции (GPP) оценивалась для 2000 года как -20.6 ‰ в LPX - Bern, и -24.9 ‰ в CLM4.5 моделях. Таким образом, дискриминация составляет 12,4 ‰ в LPX - Bern и 16,7 ‰ в CLM4.5, соответственно. По данным предыдущих исследований [Suits et al., 2005; Scholze et al., 2008] оценка CLM 4.5 находится в пределах от 15,7 до 18,1 ‰. В целях оптимизации ассимиляции и минимизации потерь воды в меняющихся условиях окружающей среды результаты показывают, что необходимо скорректировать реализацию фотосинтеза и проводимости в CLM 4.5 для лучшего согласования с наблюдаемыми тенденциями увеличения ¹³С и эффективностью использования воды на длительных временных шкалах.

Новые, глобальные данные по соотношению стабильных изотопов углерода демонстрируют небольшие изменения в (1) дискриминации и (2) соотношении iWUE с изменениями углекислоты в атмосфере. Изменения в iWUE (1990-1999 минус 1900-1909): ¹³С в годичных кольцах в сопоставлении с моделями CLM4.5 и LPX - Вегп представлены на рисунке 6. 12.



Рисунок 6. 12. Диаграмма средних региональных изменений дискриминации, рассчитанных для δ¹³С в годичных кольцах деревьев (серый столбик) и для результатов стандартных

имитационных моделей CLM 4.5 (синий) и LPX - Bern (красный). Индивидуальные климатические факторы (CO₂, азот и землепользование) были постоянными параметрами в факториальном моделировании.



Рисунок 6. 13. Изменения дискриминации в деревьях (1980-1989 минус 1900-1909): годичные кольца в сопоставлении с модельными данными, полученными при использовании CLM 4.5 (верхняя панель) и LPX - Bern (нижняя панель).

Модель LPX - Вегп показывает небольшие изменения, указывающие на уменьшение дискриминации по всему миру. Показано, что данные по содержанию δ^{13} C в годичных кольцах деревьев показывают, в среднем, незначительные изменения для XX века, увеличение iWUE пропорционально увеличению атмосферного CO₂ и устьичной проводимости, что в свою очередь относительно постоянно для соотношения c_i/c_a.

Результаты модели LPX - Вегп соответствуют реальным значениям δ^{13} С в годичных кольцах деревьев, поддерживая идею о том, что физиология устьиц адаптировалась для оптимизации процесса между накоплением углерода путем ассимиляции и потери воды за счет транспирации, и соответственно, адаптации деревьев к меняющимся условиям окружающей среды. CLM 4.5 имитирует увеличение дискриминации и, в свою очередь, изменение iWUE почти в два раза превышает измеренные значения δ^{13} С в годичных кольцах деревьев (Рисунок 6. 13). Полученные результаты требуют улучшения значений для параметризации устьичной проводимости-фотосинтеза и лимитирования азота для деревьев.

Результаты исследования показывают, что существующие данные о величине и тенденциях стабильного изотопа углерода позволяют оценить глобальный углеродный цикл в моделях. В частности, данные по содержанию углерода в годичных кольцах, которые обеспечивают понимание фундаментальных взаимосвязей между ассимиляцией углерода и устьичной проводимостью, управляющей потоком CO₂ и водой. Годичные кольца деревьев являются ретроспективным архивом об изменении отклика деревьев в погодичных и длительных колебаниях CO₂ вследствие глобального потепления.

6. 5. Выводы к главе б

1. Деревья, произрастающие в высокоширотных районах Евразии, указывают на то, что эффективность использования воды увеличивается для северо-восточных районов субарктики, по сравнению с северо-западными. iWUE увеличивается с севера на юг для Сибирского трансекта, и увеличивается для высокогорных районов Евразии.

2. По данным 76 δ^{13} С-хронологий в годичных кольцах деревьев, главным образом из Европейских, Северо-Американских и Сибирских районов исследования, были выявлены изменения в соотношении с_i/с_a, дискриминации углерода и эффективности использования воды хвойными видами. Применение наземно-биосферных моделей показало, что изменение дискриминации углерода, в основном связано с увеличением концентрации углекислоты в атмосфере.

3. Выявлено, что данные по содержанию δ^{13} С в годичных кольцах деревьев показывают, в среднем, незначительные изменения для XX века ($\approx 27\%$), увеличение iWUE пропорционально увеличению атмосферного CO₂ и устьичной проводимости, что в свою очередь относительно постоянно в соотношении CO₂ внутри листа к CO₂ в атмосфере (c_i/c_a). Однако, в контексте последнего тысячелетия выявлено значительное увеличение засушливых условий, не сопоставимых с другими периодами.

4. Результаты модели LPX - Bern соответствуют реальным значениям, измеренного содержания δ¹³С в годичных кольцах деревьев, поддерживая гипотезу о том, что физиология устьиц адаптировалась для оптимизации процессов накопления углерода путем ассимиляции и потери воды за счет транспирации, и соответственно, адаптации деревьев к меняющимся условиям окружающей среды. Полученные результаты по модели CLM4.5 требуют дополнительной параметризации значений устьичной проводимости-фотосинтеза и содержанием азота для деревьев.

5. Данные исследования помогут улучшить качество глобальных климатических моделей, где связь между вегетацией и климатом все еще ограничена.

124

ГЛАВА 7. Изменение климата и условий окружающей среды в высокоширотных районах севера Евразии

7. 1. Источники палеоклиматической информации из субарктики Евразии

Согласно докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата [IPCC 2007, 2014], некоторые аспекты современного потепления являются аномальными, однако, возможны периоды с более ярко выраженными аномалиями [Fisher et al., 2017]. Поэтому необходимо знать информацию о прошлых климатических изменениях, чтобы выявить аномально теплые и холодные периоды в истории климата Земли. А также выявить на сколько прошлые и современные аномалии были общими для других районов Евразии. Применение длительных хронологий древесных колец может помочь оценить климатические и экологические изменения в прошлом и оценить величину современного потепления.

Большинство палеоклиматических температурных реконструкций, полученных по параметрам ширины годичного кольца, содержат сезонную, главным образом летнюю климатическую информацию, по сравнению с другими природными климатическими архивами более низкого временного разрешения, такими как ледниковые керны и споропыльцевые спектры, которые представляют информацию об изменении среднегодовой и зимней температуры воздуха и осадков [Jones et al., 1998; Mann et al., 1998; Sidorova et al., 2013].

Тысячелетние реконструкции температуры воздуха, полученные для субарктических регионов [Shiyatov, 1995; Briffa 2000; Esper et al., 2002; Grudd et al., 2002; Hantemirov, Hughes et al. 1999; Naurzbaev et al., 2002; Sidorova, Naurzbaev, 2002; Hughes et al., 2018], подтверждают, что 1990-е годы были необычайно теплыми для XX века, но не самыми теплыми за последние 2000 лет. Исследования стабильных изотопов в целлюлозе годичных колец были проведены для субарктических районов Евразии [Arneth et al., 2002; Saurer et al., 2002; Kagawa et al., 2003; McCarroll, Loader, 2004; Gagen et al., 2007; Сидорова и др., 2009, 2010; Sidorova et al., 2011]. В этих исследованиях климатические изменения за последние

100-200 лет основаны на данных по содержанию углерода (δ^{13} С) и реже на данных изотопов кислорода (δ^{18} О) [Saurer et al., 2002; Sidorova et al., 2011, 2013].

Комбинированное и взаимодополняющее использование нескольких косвенных источников, регистрирующих информацию об изменении климата и условий окружающей среды позволяет глубже изучить воздействие климата на окружающую среду и на рост деревьев. Сопоставление реконструкций климата, полученных по данным разных косвенных источников информации для разных периодов позднего голоцена, включая доиндустриальный и промышленный периоды помогут ответить на вопрос: имеет ли текущее потепление аналоги в прошлом по данным разных источников палеоклиматической информации в высокоширотных районах Евразии?

7. 1. 1. Многопараметрический подход для сопоставления палеоклиматической информации по данным разных косвенных источников

Сравнительный анализ был проведен между различными косвенными источниками климатической информации разного временного разрешения с целью выявления общего климатического сигнала. Хронологии по ширине годичных колец деревьев, полученных ранее для северо-востока Якутии [Сидорова, Наурзбаев 2002; Сидорова, 2003; Hughes et al., 2018], востока Таймыра [Naurzbaev et al., 2002; Сидорова, 2003; Sidorova et al., 2013] и хронологии, полученные по стабильным изотопам углерода и кислорода в целлюлозе лиственницы Гмелина для восточной части полуострова Таймыр и лиственницы Каяндера для северо-вотока Якутии (YAK) [Sidorova et al., 2013а] для общих периодов 4111 – 3806 гг. до н.э., 917 - 1150 гг. н.э., 1791-1950 гг. н.э. были сопоставлены с данными споро-пыльцевых спектров, полученными из озера Лама, Таймыр [Andreev et al., 2004], а также δ^{18} О данных, измеренных в годичных слоях ледниковых кернов Гренландии (GISP2) [Meiert, Stuiver, 1999] и Северной Земли, Пика Академии Наук [Opel et al., 2013; Sidorova et al., 2013] (Рисунок 7. 1).

126



Рисунок 7. 1. Карта с местоположениями участков исследования вдоль высокоширотного трансекта: Восточный Таймыр (ТАҮ), северо-восток Якутии (ҮАК) (красные звезды) и участки с тысячелетними климатическими реконструкциями, которые использовались для сравнительного анализа, выделены черными звездами: Торнетраск, (Швеция, SWE) [Loader et al., 2013], Форфьерд, (Норвегия, NOR) [Young et al., 2012], северо-западная часть Квибек тайги (Канада, САN) [Naulier et al., 2015; Gennaretti et., al. 2017]. Хронологии по содержанию δ¹⁸О в ледниковых кернах Гренландии (GISP2) [Meiert, Stuiver, 1999] и Северной Земли (SZ, Пик Академии Наук), споро-пыльцевые спектры оз. Лама (LAM, выделены зеленым цветом), а также данные по колебаниям Восточно-Сибирского моря, обозначенные синим треугольником [Calafat et al., 2013].

7. 2. Изменения климата на востоке Таймыра

7. 2. 1. Современный период

Для периода 1791-2008 гг. н.э. были рассмотрены хронологии по ширине годичных колец деревьев (TRW) и стабильным изотопам (δ^{13} C, δ^{18} O), построенным для восточной части полуострова Таймыр (Рисунок 7. 2) [Sidorova et al., 2013]. Увеличение радиального

прироста деревьев наблюдалось в период с 1912 по 1960 годы, который достигал максимума в 1941 году (Рисунок 7. 2 а). После 1960 года TRW демонстрирует слегка снижающуюся тенденцию, в то время как хронология по δ^{13} С показывает продолжительный положительный тренд (Рисунок 7. 2 б). Значимое понижение δ^{18} О данных в течение 1791-1840 гг. н.э. может быть связано с Малым ледниковым периодом [Lamb, 1977], и указывает на один из самых холодных периодов (Рисунок 7. 2. в). Средние, минимальные и максимальные значения, а также стандартное отклонение для хронологий представлены в Таблице 7. 1.

Значимые коэффициенты корреляции между хронологиями по изотопам углерода и кислорода были найдены для погодичных (r = 0,44; p < 0,05) и сглаженных 41-летним окном Хэмминга (r = 0,59; p < 0,05) данных, для периода с 1791 по 2008 годы. Хронологии также значительно связаны с TRW для погодичных и сглаженных данных по соотношению углерода (r = 0,18; r = 0,44; p < 0,05) и кислорода (r = 0,26; r = 0,38, p < 0,05) в целлюлозе годичных колец для периода с 1791 по 2008 гг.

7. 2. 2. Средневековый период потепления

Максимальные значения в 925 г., 983 г., 1015 г., 1081 г. и 1150 г. н.э. были зафиксированы в хронологиях годичных колец деревьев лиственниц восточного Таймыра (Рисунок 7. 2 в). Содержание изотопа углерода в целлюлозе (Рисунок 7. 2 д) и хронологии по TRW (Рисунок 7. 2 б) показывают общие закономерности для периода 917 - 1150 гг. н.э., которые значимо связаны друг с другом в высокочастотных (погодичных) ($\mathbf{r} = 0,18$; p < 0,05) и низкочастотных (длительных) ($\mathbf{r} = 0,36$; p < 0,05) колебаниях. Однако, хронология по δ^{18} О в целлюлозе (Рисунок 7. 2 з) показывает противоположный длительный тренд по сравнению с другими параметрами со значимыми отрицательными корреляциями в сглаженной хронологии по TRW ($\mathbf{r} = -0,19$; p < 0,05), а также в хронологии по изотопам углерода ($\mathbf{r} = 0,24$; p < 0,05).

Статистические характеристики параметров TRW с минимальными и максимальными значениями представлены в Таблице 7. 1 для каждого периода отдельно. Среднее значение ширины годичного кольца для периода с 917 по 1150 гг. н. э. было выше по сравнению с

современным периодом потепления, тогда как среднее значение δ^{13} С было ниже, а среднее значение δ^{18} О было очень сходным (Таблица 7. 1).

7. 2. 3. Климатический оптимум

Интересно отметить, что в течение периода 4111 - 3806 гг. до н.э. были обнаружены увеличения значений по ширине годичных колец деревьев и изотопов углерода и кислорода (Рисунок 7. 2 в, е, и). Хронология индекса TRW показывает значимые статистические связи с хронологией по содержанию изотопов углерода и кислорода в погодичных (r = 0,26; r = 0,25; p < 0,05) и длительных (r = 0,69; r = 0,73; p < 0,05) колебаниях. Кроме того, хронология изотопов углерода и кислорода значительно коррелирует в погодичных (r = 0,25; p < 0,05), так и в сглаженных (длительных) (r = 0,45; p < 0,05) временных рядах за весь анализируемый период. Примечательно, что среднее значение изотопа углерода для периода с 3906 г. до 3806 г. до 1900 г. по 2008 г. н.э. Напротив, среднее значение кислорода в период с 3906 г. до 3806 г. до н.э. относительно ниже по сравнению со средневековым и современным потеплениями (Таблица 7. 1).



Рисунок 7. 2. Погодичные (черные линии) и сглаженные 41-летним окном Хэмминга-(жирные черные линии) хронологии по ширине годичных колец деревьев (а, б, в), δ¹³С (г, д, е) и δ¹⁸О (ж, з, и) в целлюлозе для периодов с 1791 по 2008 гг. н. э., 900 - 1150 гг. н. э. и для 4111 - 3806 гг. до н. э.

Таблица 7. 1. Статистические характеристики между хронологиями, полученными по ширине годичного кольца (TRW), δ¹³С и δ¹⁸О в целлюлозе лиственницы представлены для периодов с 3906 г. по 3806 г. до н. э., с 917 г. по 1150 г. н. э., и с 1900 г. по 2008 г. н. э. для восточного Таймыра.

Период	3906-3	3806 гг.	до н.э.	917-11	50 гг. н	.Э.	1900-2008 гг. н.э.			
Параметр	TRW	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	TRW	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	TRW	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	
	[MM]	[‰]	[‰]	[мм]	[‰]	[‰]	[мм]	[‰]	[‰]	
Среднее	0,8	-23,5	20,1	1,2	-25,0	21,4	0,7	-23,6	21,3	
значение										
Среднеквадратическое	0,4	0,7	0,8	0,5	0,7	1,3	0,4	0,6	0,8	
отклонение										
Минимальное	0,2	-24,9	18,0	0,1	-27,0	18,7	0,1	-25,4	19,6	
значение										
Максимальное	1,7	-21,3	22,2	2,7	-23,2	26,2	2,0	-21,7	23,4	
значение										

7. 3. Многопараметрический подход для сопоставления палеоклиматической информации по данным разных косвенных источников

Чтобы выявить общие климатические сигналы между различными климатическими архивами, были сопоставлены хронологии, полученные по стабильным изотопам для востока Таймыра с реконструкциями июльских температур и аномалий осадков, полученных по споро-пыльцевым спектрам [Andreev et al., 2004], а также данными, полученными по содержанию δ^{18} О в ледниковом керне Гренландии (GISP2) [Meiert, Stuiver, 1999], для трех анализируемых периодов (Рисунок 7. 3 а, б, в). Временные ряды по содержанию δ^{18} О в ледниковом керне Академии Наук, Северная Земля были доступны для сравнительного анализа для периодов с 917 г. по 1150 г. н. э. и с 1791 г. по 1950 г. н. э. (Рисунок 7. 3 б, в). Корреляционный анализ показал, что сглаженные июльские температуры и реконструкции осадков, полученные по данным споро-пыльцевых спектров, соответствуют всем проанализированным косвенным источникам для трех анализируемых периодов (Таблица 7. 2, Рисунок 7. 3). Однако, корреляции значимо различаются в анализируемых периодах. Так, для современного периода все косвенные источники положительно и значимо коррелируют, отражая подобные климатические реакции. В то время как для периода с 4111 г. по 3806 г. до н. э. связь между споро-пыльцевыми данными и содержанием углерода в целлюлозе годичных колец, а также изотопных хронологий кислорода в целлюлозе показывают противоположные (разнонаправленные) тренды (Таблица 7. 2, Рисунок 7. 3 а).

Таблица 7. 2. Коэффициенты корреляции между хронологиями по ширине годичных колец деревьев (TRW), δ^{13} С, δ^{18} О в целлюлозе годичных колец, GISP2 [Meiert, Stuiver, 1999], температурой воздуха в июле (T7) и атмосферными осадками в июле (O7), а также данными по δ^{18} О в ледниковом керне Северная Земля (C3) [Opel et al., 2013] для общих периодов с 4111 по 3806 г. до н. э., с 917 по 1150 г. н.э. и с 1791 по 1950 г. н.э [Sidorova et al., 2013]. Данные хронологии сглажены 41-летним окном Хэмминга.

Период		41	11-3806 1	гг. до н.	Э		917-1150 гг. н.э.						1791-1950 гг. н.э							
Параметр	TRW	δ ¹³ C	δ ¹⁸ Ο	GISP2	T7	07	TRW	δ ¹³ C	δ ¹⁸ Ο	GISP2	T7	07	C3	TRW	$\delta^{13}C$	δ ¹⁸ Ο	GISP2	T7	07	C3
TRWi	1,00						1,00							1,00						
δ ¹³ C	0,69	1,00					0,36	1,00						0,72	1,00					
δ ¹⁸ Ο	0,73	0,22	1,00				-0,19	-0,29	1,00					0,51	0,51	1,00				
GISP2	0,35	0,22	0,12	1,00			-0,08	-0,05	0,57	1,00				0,55	0,25	0,18	1,00			
T7	0,12	-0,33	-0,47	0,12	1,00		-0,26	0,49	0,48	0,35	1,00			0,26	0,90	0,52	0,26	1,00		
07	0,15	-0,15	-0,29	0,15	0,97	1,00	-0,26	0,50	0,48	0,35	0,99	1,00		0,26	0,90	0,52	0,26	0,99	1,00	
C3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,36	0,40	-0,72	-0,52	-0,42	-0,41	1,00	0,82	0,88	0,42	0,23	0,95	0,95	1,00

Статистически значимые данные выделены жирным шрифтом при p < 0,05. Данные по содержанию δ^{18} О в ледниковом керне Северная Земля (SZ) для периода с 4111 г. по 3806 г. до н. э. отсутствуют (NA).

Таблица 7. 3. Коэффициенты корреляции между хронологиями, полученными по ширине годичного кольца деревьев (TRW), δ¹³C и δ¹⁸O в хронологиях целлюлозы лиственницы для восточного Таймыра (TAY) и северо-востока Якутии (YAK) [Sidorova et al., 2013] в сопоставлении с δ¹⁸O в ледниковом керне Гренландии (GISP2) [Meiert, Stuiver, 1999], и Северной Земли (C3) [Opel et al., 2013] за общий период с 917 до 1000 гг. н. э. и с 1880 по 1986 гг. н. э. Данные, сглаженные 41-летним окном Хэмминга представлены в скобках.

Регион			TAY			GISP2		
	Параметр	TRW	$\delta^{13}C$	δ ¹⁸ Ο	TRW	$\delta^{13}C$	δ ¹⁸ Ο	
TAY	TRW	1,00						
	δ ¹³ C	0,92 (0,10)	1,00					
	δ ¹⁸ Ο	-0,77 (-0,84)	-0,66 (-0,09)	1,00				
YAK	TRW	0,56 (0,08)	0,70 (0,77)	-0,49 (0,09)	1,00			
	δ ¹³ C	0,82 (-0,10)	0,69 (0,68)	-0,95 (0,27)	0,41 (0,62)	1,00		
	δ ¹⁸ Ο	0,44 (0,47)	0,64 (0,32)	-0,52 (-0,31)	0,67 (0,53)	0,57 (0,52)	1,00	
GISP2	δ ¹⁸ Ο	0,10 (0,57)	0,36 (0,23)	-0,04 (-0,19)	0,18 (0,26)	0,19 (0,59)	0,78 (0,55)	1,00
SZ	δ ¹⁸ Ο	0,70 (0,73)	0,45 (0,61)	-0,76 (-0,73)	0,46 (0,58)	0,73 (0,11)	0,16 (0,49)	-0,38 (0,25)

Данные, выделенные жирным черным цветом являются значимыми для *p* < 0,05



Рисунок 7. 3. Хронологии, полученные по ширине годичных колец деревьев (зеленые линии), δ^{13} С (красные линии) и δ^{18} О (синие линии) в целлюлозе годичных колец; реконструкции температуры воздуха июля (розовые линии) и осадков июля (светло-голубые линии), полученные по данным споро-пыльцевых спектров озера Лама, Полуостров Таймыр [Andreev et al., 2004]. δ^{18} О в ледниковых кернах Гренландии (серые линии) [Meiert, Stuiver, 1999] представлены для периода с 4111 г. по 3806 г. до н.э. Все хронологии сглажены 41-летним окном Хэмминга.

Хронология по содержанию кислорода в ледниковом керне Гренландии (GISP2) для периода 917 – 1150 гг. н. э. значимо и положительно коррелирует только с δ^{18} О хронологией в целлюлозе годичных колец, в то время как все остальные косвенные источники хорошо согласуются с GSIP2 во время средневекового и современного потеплений климата. Данные δ^{18} О в ледниковом керне показали отрицательно значимые корреляции почти со всеми

косвенными источниками в течение средневекового периода, когда характер кривых был однонаправленным, а корреляции положительными.

Дополнительное сравнение этих косвенных архивов было сделано для средневекового и современного периодов для хронологий по годичным кольцам, для хронологий по углероду и кислороду в целлюлозе годичных колец, полученных для северо-востока Якутии [Sidorova et al., 2008], с 917 по 1000 гг. н. э. и для периода с 1880 по 1986 гг. н. э. (Рисунок 7. 4, Таблица 7. 3). Таким образом, во время средневекового периода (приблизительно от 950 до 1020 гг. н. э.) хронология по TRW для Якутии показывает задержку по сравнению с Таймырской хронологией, что указывает на более позднее начало теплого периода (Рисунок 7. 4 а). Аналогичный климатический отклик был найден для периода современного потепления для северо-восточной части Якутии. Более того, из-за задержки отклика деревьев, произрастающих на востоке Таймыра и северо-востоке Якутии в течение последнего периода происходит расхождение трендов. δ^{18} О в целлюлозе для Якутии значимо коррелирует с δ^{18} О в ледниковом керне Гренландии, как в средневековой, так и в период современного потепления климата (Таблица 7. 3, Рисунок 7. 4). Данные по δ^{13} С показали противоположно направленный тренды между хронологиями, полученными для Таймыра и Якутии для средневекового периода, в то время как тренды были аналогичными для современного периода (Рисунок 7. 4). Наибольшая согласованность для средневекового периода была найдена между δ^{18} О в целлюлозе для Якутии с данными GISP2 [Meiert, Stuiver, 1999] (Таблица 7. 3). В то время как, значимая корреляция была найдена между данными по содержанию δ^{18} О в ледниковом керне Северная Земля и хронологии, полученной по годичным кольцам, для Таймыра во время средневековых и современных периодов (Таблица 7. 3; Рисунок 7. 4 а, б). Длительные тренды между данными по Якутии и Таймыру в течение современного периода схожи между собой, в то время как различны для средневекового периода.



Рисунок 7. 4. Нормированный индексы древесно-кольцевых хронологий (а, г), δ^{13} С (б, д), δ^{18} О (в, е) в целлюлозе годичных колец восточного Таймыра (зеленые линии) и северовостока Якутия (красные линии) [Sidorova et al., 2008, 2013] в сопаставлении с δ^{18} О в ледниковых кернах Гренландии GISP2 (серые линии) [Meiert, Stuiver, 1999] и Северная Земля (черные линии) [Opel et al., 2013] для средневекового (а, б, в) и современного (г, д, е) периодов.

Наличие различных климатических архивов, в районе полуострова Таймыр, охватывают несколько тысячелетий, что дает возможность исследовать климатические и

экологические изменения вследствие антропогенных воздействий, таких как увеличение концентрации CO_2 в атмосфере в течение современного периода, и связи с более ранними изменениями в прошлом без воздействия человеческого фактора. Вместе с тем, объединение разных архивов также имеет некоторые проблемы. Ежегодная информация о длительных и погодичных климатических и экологических изменениях регистрируется в древесных кольцах, ледниковых кернах и споро-пыльцевых спектрах. Однако, эти данные могут содержать различную сезонную информацию, в частности: древесные кольца и споропыльцевые спектры содержат климатическую информацию об изменении как летних, так и среднегодовых температур воздуха и атмосферных осадков [Andreev et al., 2004; Sidorova et al., 2012], а ледниковые керны содержат информацию о среднегодовой температуре воздуха [Meese et al., 1994].

Впервые для восточного Таймыра были получены и проанализированы хронологии по ширине годичных колец деревьев и стабильным изотопам (δ^{13} C и δ^{18} O) в целлюлозе годичных колец для периодов: 4111 - 3806 гг. до н.э.; 917 - 1150 гг. н.э.; 1791 - 2008 гг. н.э. Предыдущее исследование Наурзбаева и соавторов [Naurzbaev et al., 2002] показало, что температура воздуха в июне-июле определяет 45 % вариации радиального роста деревьев на востоке Таймыра для периода с 1933 по 1989 гг. н.э. Исходя из этих результатов, хронологии по ширине годичных колец могут быть рассмотрены как индикаторы, содержащие сигнал июнь-июльской температуры воздуха. Сигналы температуры воздуха и атмосферных осадков июля также регистрируются данными пыльцы, полученными из донных отложений озера Лама [Andreev et al., 2004]. Июльские реконструкции температуры воздуха и осадков по споро-пыльцевым спектрам В значительной степени соответствуют всем проанализированным косвенным источникам в течение трех исследуемых периодов. Показано, что средние значения TRW хронологии для периода 4111-3806 гг. до н. э. выше по сравнению с современным периодом 1791 - 2008 гг. н.э. Это может указывать на более естественные климатические условия в прошлом по сравнению с современными изменениями, котрые характеризуются значительными антропогенными воздействиями. Реконструкция температуры воздуха июля, полученная по споро-пыльцевым данным, показывает схожие температурные тренды для всех изученных периодов (Рисунок 7. 4).

Анализ изотопов углерода дает информацию об изменениях влажности в прошлом и современном периодах. Исследования Сидоровой с соавторами [Sidorova et al., 2008, 2011] показали, что углерод в целлюлозе годичных колец лиственниц зафиксировал положительный смешенный сигнал июльской температуры воздуха, а также отрицательный июльский сигнал осадков, поскольку высокие температуры усиливают физиологическую реакцию деревьев при низких осадках. Увеличение значений изотопов углерода указывает на более теплые и сухие климатические условия в период с 4111 по 3806 гг. до н. э. (Рисунок 7. 2) по сравнению с 917 г. по 1150 г. н.э. (Рисунок 7. 2, Таблица 7. 1). Изотопные значения кислорода показали тенденцию к увеличению в течение последнего периода с 1791 по 2008 гг. н.э. и с 4111 по 3806 гг. до н.э., в то время как для содержания δ^{18} О в целлюлозе годичных колец во время средневскового периода не было обнаружено увеличения тренда.

Основываясь на анализе стабильных изотопов углерода и кислорода, можно заключить, что средневековой период на Таймыре был более влажным по сравнению с периодом современного потепления и с периодом климатического оптимума.

TRW Сравнительные анализы между хронологиями, полученными по И соотношением стабильных изотопов углерода и кислорода в цеоллюлозе годичных колец для восточной части полуострова Таймыр и δ^{18} О хронологией в ледниковом керне Академии Наук Северная Земля для периодов средневекового и современного потеплений показали, что теплыми и влажными были условиями во время средневекового периода, однако теплыми и сухими были условия окружающей среды, зафиксированные косвенными источниками во время современного потепления. Напротив, данные δ^{18} O измеренные в слоях ледникового керна Гренландии (GISP2) и параметров годичного кольца, полученных для северо-востока Якутии, указывают на теплый и сухой климат в начале средневековья и современного периодов. Так как лиственницы произрастают в зоне многолетней мерзлоты, они могут накапливать осадки, а смешение верхних слоев талой воды из мерзлоты и атмосферных осадков отражается в сигнале δ^{18} О в целлюлозе годичных колец. Этот сигнал может фиксировать схожую информацию в воде, используемую деревьями, растущими в зоне мнололетней мерзлоты и атмосферными осадками, накопленными в виде слоев в ледниковых кернах.

139

Различия между изменениями влажности во время средневекового и современного периодов могут быть объяснены различными источниками осадков в разные периоды времени и различными массами атмосферной циркуляции. Регион Таймырского полуострова очень чувствителен к климатическим колебаниям, потому что он расположен в переходной зоне между атлантической частью Западной Сибири и более континентальной частью Восточной Сибири. Изменения в массах атмосферной циркуляции, которые переносят осадки, а также приводят к изменениям источников воды для деревьев, могут различаться в течение современных или прошлых периодов. Исследования Троует и соавторов [Trouet et al., 2009] сообщили об эффекте постоянного положительного влияния североатлантического колебания (NAO) в период средневековой климатической аномалии, которая привела к изменению климатических условий в северных районах. В то время как реконструкции на основе результатов глобальных климатических моделей и других косвенных источников выявили ослабевание влияния NAO в Малый ледниковый период. Основываясь на данных древесных колец и стабильных изотопов с погодичным временным разрешением, обнаружено, что период с 4111 до 3850 гг. до н.э. был довольно теплым и сухим. Маевский и др. [Mayewski et al., 2004] в своем исследовании показали, что солнечная активность является форсированной для периода 4050-3050 гг. до н.э., которая совпадает с максимумами Δ^{14} С и ¹⁰Be, что свидетельствует о снижении солнечной энергии [Mayewski et al., 2004]. Снижение летней инсоляции в период Голоцена, а также различия в атмосферных циркуляционных массах, связанные с изменчивостью низкой точки Исландии и высокой – в Сибири, могут быть причиной более теплого и сухого климатического оптимума по сравнению со средневековым периодом. Значения по содержанию δ^{18} О в целлюлозе годичных колец несколько уменьшалась в 3800 г. до н.э., что может указывать на переходный период, со смещением на более влажные и более холодные климатические условия [Mayewski et al., 2004; Heinz et al., 2008].

Климатический оптимум на востоке Таймыра был более теплым и сухим по сравнению со средневековым периодом, скорее похожим на период современного потепления. Результаты показывают, что средневековой период начался раньше и был более влажным, чем на северо-востоке Якутии. Июльские реконструкции осадков, полученные по данным споро-пыльцевых спектров озера Лама, изотопов кислорода из ледникового керна Академии наук, Северная Земля и новым данные по соотношению изотопов углерода в целлюлозе лиственниц хорошо согласуются между собой и указывают на более влажные климатические условия во время средневекового периода.

Последовательные крупномасштабные были закономерности отражены В корреляционных связях между данными по δ^{18} О в целлюлозе годичных колец лиственниц, полученными для восточной части полуострова Таймыр и северо-востока Якутии, а также данными δ^{18} О в ледниковых кернах Северной Земли и Гренландии для средневекового и современного периодов. Таким образом, современное потепление не является беспрецедентным на севере Сибири. Подобные климатические условия регистрировались древесными кольцами, стабильными изотопами, пыльцевыми спектрами и данными по содержанию стабильных изотопов кислорода в ледниковых кернах около 6000 лет назад.

7. 4. Общий палеоклиматический сигнал в хвойных для высокоширотных районов Евразии

Для выявления общего климатического сигнала вдоль высокоширотного трансекта были рассмотрены реконструкции, полученные по данным изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец хвойных для северо-востока Якутии (YAK) и востока Таймыра (TAY) [Churakova (Sidorova) et al., 2018 на рецензии], Кольского полуострова (KOL) по данным Татьяны Бетгер (UFZ, Германия) [Kremenski et al., 2004]; Лаанила (Лапландия, Финляндия, LAN) [Gagen et al., 2012]; Торнетраск (Швеция, SWE) [Loader et al., 2013] и Квибек тайга (Канада, CAN) [Gennaretti et al., 2017] (Таблица 2. 1).

Общими факторами, оказывающими влияние на рост хвойных от восточной до западной части субарктики, являются: (1) летняя температура воздуха; (2) суммарная продолжительность солнечного сияния; (3) сигнал об изменении атмосферных осадков и влияния северо-атлантических циркуляционных масс, в большей степени проявляющихся для Таймырского полуострова и Фенноскандинавии.

7. 4. 1. Влияние летней температуры воздуха на рост хвойных

Значимое влияние летней температуры воздуха на рост хвойных из субарктических районов показано в многочисленных исследованиях, как по данным ширины годичных колец деревьев [Ваганов и др., 1996; Briffa et al., 1998; Hughes et al., 1999; Grudd et al., 2002; Сидорова, Наурзбаев, 2002; Naurzbaev et al., 2002; Сидорова, 2003; Sidorova et al., 2010], по максимальной плотности поздней древесины годичного кольца [Briffa et al., 2000; Kirdyanov et al., 2007; Sidorova et al., 2010], клеточным хронологиям [Panushkina et al., 2005; Churakova (Sidorova) et al., 2014], и по содержанию изотопов углерода и кислорода [Saurer et al., 2004; Sidorova et al., 2008, 2010; Loader et al., 2013; Young et al., 2015; Churakova (Sidorova) et al., 2013, 2016b, 2018] в древесине и целлюлозе годичных колец деревьев. Рассматривая субарктические районы Европы, главным образом район Фенноскандии (Норвегия, Швеция, Финляндия) Гаген и соавторы [Gagen et al., 2016] показали, что температурные вариации отклонялись от средних значений и характеризовались проявлением экстремальных событий в пределах последних двух тысячелетий, которые в основном, обусловлены внутренними климатическими процессами. Однако, температура воздуха июля оказалась стабильно значимой для калибровочного и верификационного периода только для северо-востока Якутии [Churakova (Sidorova) et al., 2018) по данным всех субарктических тысячелетних изотопных хронологий. Как показано в Главе 2 значимые изменения температуры воздуха июля стали происходить после 1950-х г., показывая увеличение температуры воздуха примерно на 1,7°С, по сравнению с периодом 516-1949 гг. н.э. Однако, для периода с 1900 по 1949 гг., характеризующимся менее выраженным воздействием содержания СО₂ в атмосфере и более выраженным с 1950 по 2004 гг. температура воздуха июля увеличилась ≈ на 0,8°С.

Облачность является одним из наиболее важных факторов, контролирующих радиационный баланс Земли [Gagen et al., 2012]. Реакция облачного покрова на повышение глобальных температур представляет собой наибольшую неопределенность в модельных оценках будущего климата, поскольку связь между температурой и облачностью не до конца ясна.

Полученные реконструкции по продолжительности солнечного сияния, в течение июня-августа по данным изотопа углерода в целлюлозе сосны (*Pinus sylvestris* L.) для таких районов исследования как Торнетраск в Швеции [Loader et al., 2013], Лаанила в Финляндии [Gagen et al., 2012], Форфьерд в Норвегии [Young et al., 2012] и в верховьях р. Индигирки на северо-востоке Якутии для июля месяца по данным стабильных изотопов в целлюлозе годичных колец лиственниц позволили впервые провести сравнительный анализ (Рисунок 7. 5).

Исследования, проведенные Лоадер с соавторами [Loader et al., 2013] по содержанию δ^{13} С в целлюлозе годичных колец сосны для района Швеции показали, что Малый ледниковый период (LIA) был солнечным, с облачными проявлениями в течение теплых периодов средневековья (Рисунок 7. 5 б). Многолетнее моделирование климата предполагает, что регионально низкие температуры во время LIA в основном объяснимы низким содержанием CO₂ и более влажными условиями произрастания, по сравнению со средневековым или современным потеплениями. Ранний период средневекового и современного потепления является схожим для севера Фенноскандии и северо-востока Якутии. В то время как аномальные климатические изменения выявлены для средневекового потепления (XIII в).



Рисунок 7. 5. Реконструкции суммарной продолжительности солнечного сияния, полученные для: северо-востока Якутии [Churakova (Sidorova) et al., 2018 на рецензии] (a); Швеции [Loader et al., 2013] (б); и Норвегии [Young et al., 2012] (в).

Выявленные различия между летней температурой воздуха и продолжительностью солнечного сияния могут быть проинтерпретированы как изменения циркуляционных процессов, ассоциированных с перемещением полярного фронта в направлении юга
(Рисунок 7. 6 а). Изменения, затрагивающие погодный режим, такие как Арктические колебания, являются результатом стабильных антициклонических условий для северной Фенноскандии, которые обеспечивали механизм развития Малого Ледникового периода по всей Европе [Loader et al., 2013].



Рисунок 7. 6. Реконструкции по температуре воздуха (красный цвет) и продолжительности солнечного сияния (синий цвет) для: (а) Норвегии [Young et al., 2012] в сопоставлении с (б) северо-востоком Якутии [Churakova (Sidorova) et al., 2018] и хронологией колебания уровня Восточно - Сибирского моря (70° с. ш., 162° в. д.) для периода с 1951-1994 гг. (черный цвет) [Calafat et al., 2013].

Для северо-востока Якутии средневековой период был солнечным, в отличии от облачного и влажного Малого Ледникового (LIA) периода. Однако, средневековой период 1081 - 1115 гг. был более солнечным, по сравнению с современным периодом (Рисунок 7. 6 б). Снижение продолжительности солнечного сияния может быть обусловлено влиянием циклонической деятельности на полярном фронте, а также влиянием колебания уровня Восточно-Сибирского моря под влиянием роста температур и углекислоты в атмосфере [Calafat et al., 2013] (Рисунок 7. 6 б). Несмотря на то, что фактор, оказывающий влияние на хвойные вдоль высоких широт является одинаковым, однако, он неоднородно фиксируется деревьями для различных палеоклиматических периодов.

7. 4. 3. Роль осадков и северо-атлантических циркуляционных масс

Изучение влияния атмосферных осадков на рост хвойных из высокоширотных районов Евразии особенно необходимо, в связи с ростом температуры воздуха, концентрации углекислоты в атмосфере и увеличения эвапотранспирации. Ранее для субарктических районов Евразии по данным ширины годичных колец деревьев большое внимание было уделено изменениям температурного режима, как основного фактора, определяющего рост хвойных в субарктических районах Евразии [Briffa et al., 1998; Hughes et al., 1999; Сидорова, 2003; Vaganov et al., 2006]. Влияние осадков по данным ширины годичных колец деревьев для северо-востока Якутии и восточной части полуострова Таймыр выявлено не было. Связи с осадками, в большинстве случаев были выявлены только для Европейских районов [Мазепа, 1998]. Однако, использование анализа стабильных изотопов углерода в целлюлозе годичных колец деревьев хвойных для субарктических районов Евразии позволило выявить влияние осадков [Sidorova et al., 2008, 2009, 2010, 2013; Churakova (Sidorova) et al., 2016b, 2018 на рецензии] на рост хвойных.

Реконструкция осадков июля, полученная по данным δ^{13} С для востока Таймыра указывает на значительное снижение количества осадков с 1800-х годов, что свидетельствует о засушливых условиях. Более влажными периодами являлись IX, XI-XII. Негативные фазы арктических колебаний, реконструированные по содержанию δ^{18} О в целлюлозе годичных колец лиственницы, влекут за собой увеличение осадков, в то время как положительные фазы, свидетельствуют о снижении осадков, что ведет к засушливым условиям в данном районе исследования. Интересен тот факт, что, основываясь на реконструированных данных, период IX-Х веков характеризовался более сухими условиями мая, по сравнению с современным периодом. Для северных районов Европейской части Евразии (Норвегия, Швеция, Финляндия) летние температуры значительно варьировались в течение последнего тысячелетия [Gagen et al., 2016]. Эти процессы включают внутренне генерируемые перераспределения осадков и облачного покрова, связанные с колебаниями циркуляционных масс и штормов [Gagen et al., 2016]. В отличие от последних лет XX века, региональные вариации летнего шторма в прошлом тысячелетии демонстрируют слабую реакцию на внешнее форсирование и доминирование стохастической внутренней изменчивости [Calafat et al., 2013; Gagen et al., 2016].

7. 5. Выводы к главе 7

Таким образом, выявлено, что:

1. Хронологии, полученные по TRW, δ¹³C и δ¹⁸O в целлюлозе годичных колец для восточной части Таймырского полуострова показывают, что период с 4111 по 3850 гг. до н.э. был теплее и суше по сравнению с периодом 1900 - 2008 гг. н.э. Данные по TRW и содержанию стабильных изотопов углерода и кислорода, полученные для современного периода показывают сходство с периодом 3906 - 3806 гг. до н. э.

2. Обнаружен общий сигнал между реконструкциями по температуре воздуха и атмосферным осадкам июля, полученным по данным споро-пыльцевых спектров и δ^{18} О в годичных слоях ледникового керна Гренландии (GISP2) для периодов: с 4111 по 3850 гг. до н. э.; с 900 по 1150 гг. н. э; и с 1791 по 2008 гг. н. э. Разнонаправленные тренды наблюдались для средневекового периода между данными по содержанию стабильных изотопов в древесине годичных колец и споро-пыльцевыми спектрами. Не смотря на это, все косвенные источники показывают высокую согласованность между собой для современного периода, что может быть связано со схожестью трендов под влиянием увеличения углекислоты в атмосфере.

3. Выявлено, что период средневекового потепления по-разному регистрируется в древесных кольцах сибирских деревьев по восточному Таймыру и Якутии. На Таймыре потепление выявлено раньше по сравнению с Якутией. Хронологии, полученные по стабильным изотопам целлюлозы для восточного Таймыра для средневекового периода, указывают на наиболее влажные климатические условия, чем для северо-востока Якутии. Однако, во время текущего потепления для двух регионов исследования, востока Таймыра и северо-востока Якутии регистрировались более засушливые условия, чем в течение средневекового периода.

4. Установлено, что потепление XX века не является беспрецедентным на сибирском севере, ни относительно абсолютной температуры, ни темпов изменения. Подобные климатические условия до настоящего времени регистрировались древесными кольцами, споропыльцевыми спектрами и ледниковыми кернами около 6000 лет назад.

5. Проведенный сравнительный анализ климатических реконструкций вдоль высокоширотного трансекта позволил выявить, что средневековой период был теплым, а

Малый ледниковый период был холодным для всех высокоширотных районов с некоторой неоднородностью начала и конца потепления и похолодания, соответственно. Однако, для Швеции, Финляндии и Таймыра средневековой период был влажным, а для северо-востока Якутии особенно более поздний период был более сухим и солнечным. Малый ледниковый период был холодным и влажным в восточной части субарктики Евразии (восток Таймыра), а для западной Европейской части был холодным и солнечным. Период современного потепления является схожим со средневековым для всех районов исследования.

6. Сочетание классических дендрохронологических методов с анализом стабильных изотопов позволяет выявить дополнитнльные факторы, оказывающие влияние на климатические и экологические изменения. В частности, влияние осадков, солнечной радиации, VPD, арктических коллебаний, которые регистрируются только в данных стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годичных колец деревьев.

7. Многопараметрический подход, основанный на сочетании природных архивов с высоким и низким временным разрешением, может принципиально улучшить качество климатических реконструкций. ГЛАВА 8. Многопараметрический подход к изучению изменения климата и условий окружающей среды на Алтае по данным стабильных изотопов в целлюлозе годичных колец, ледниковых кернов и озерных отложений

8. 1. Многопараметрический подход

Деревья, растущие в высокогорных районах Евразии очень чувствительных к изменениям климата и окружающей среды [Körner et al., 2005, 2012, 2015, 2017; Loader et al., 2010; Sidorova et al., 2012].

Ежегодная информация о прошлых изменениях климата и окружающей среды регистрируются в разных природных архивах, таких как: древесные кольца, ледниковые керны, кораллы, исторические записи, озерные отложения [Jones et al., 1998; Mann et al., 1998, 2008; Bradley, 1999; Ammann, Wahl, 2007; Sidorova et al., 2012]. Температурный сигнал с сезонным или еженедельным разрешением можно извлечь только из древесных колец.

До сих пор, использование многопараметрического подхода для высокогорных районов ограничено [Sidorova et al., 2011, 2012]. Хотя климатическая информация, полученная по максимальной плотности поздней древесины, толщине клеточной стенки и содержания стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе древесных колец являются уникальным набором, несущим в себе информацию о разных климатических факторах и сезонности [Schweingruber et al., 1996; Ваганов и др., 1999, 2006; McCarroll, Loader, 2004; Helle, Schlesser, 2004; Сидорова и др., 2010; Sidorova et al., 2012].

Основываясь на предыдущих исследованиях для высокогорных районов, в частности для высокогорного Алтая, ширина годичных колец деревьев несет информацию, главным образом об изменении температуры воздуха июня и июля [Мыглан и др., 2009]. максимальная плотность поздней древесины содержит климатический сигнал об изменении температуры воздуха июля и августа [Sidorova et al., 2012; Büntgen et al., 2016], а хронология по толщине клеточной стеки расширяет сезон с июня по август [Fonti et al., 2013].

Применение анализа стабильных изотопов в комбинации с классической дендрохронологией особенно необходимо, т.к. стабильные изотопы (δ^{13} C, δ^{18} O) в древесине или целлюлозе годичных колец обеспечивают дополнительной информацией о климатических вариациях [McCarroll, Loader, 2004; Saurer et al., 2002; Скомаркова и др., 2006; Gagen et al., 2007; Кирдянов и др., 2008; Kress et al., 2010; Сидорова и др., 2008, 2009, 2010, 2011, 2012]. Изотопное соотношение ${}^{13}C/{}^{12}C$ в кольцах деревьев отражает доступность источника воды для деревьев и содержание влажности воздуха, как факторы, влияющие на соотношение углерода и воды. Деревья реагируют на ограниченные водные ресурсы, такие как низкое количество осадков и относительно теплые и сухие условия с уменьшением устьичной проводимости (g₁) для предотвращения засушливых стрессовых условий. Заданные значения скорости фотосинтеза с низким значением g₁ уменьшают дискриминацию ${}^{13}C$ против ${}^{12}C$ и ведут к увеличению значений ${}^{13}C$. Вода, попавшая в почву, поглощается корнями деревьев и проходит через ксилему. Соотношение изотопов ${}^{18}O/{}^{16}O$ содержит сигнал о температуре и осадках, которые хранятся в древесине и целлюлозе деревьев [Craig, 1961; Dansgaard, 1964; Saurer, Siegwolf 2007].

Поэтому изотопы углерода и кислорода, измеренные в древесных кольцах, являются полезным инструментом для лучшего понимания отклика деревьев на климатические изменения на физиологическом уровне. Основываясь на этом двойной изотопный подход, может помочь выделить влияние температуры, солнечной радиации или наличия воды (осадков), влажности воздуха в качестве движущего климатического параметра. Данная информация недоступна из параметров ширины годичных колец.

Ледниковые керны и озерные отложения несут информацию о долгосрочных климатических и экологических изменениях от ежемесячного до годового временного разрешения. Высокое временное разрешение в ледниковых кернах, однако, ограничено изза сильного истончения погодичных слоев с глубиной [Nye, 1963]. Реконструкции температуры, осадков и других параметров окружающей среды по данным озерных отложений производится по широкому выбору литолого-геохимических параметров, которые могут быть использованы для временной калибровки [Ильяшук, Илышук 2007]. Существуют некоторые неопределенности в осадочных параметрах, так как осаждение зависит от двух параметров, как от температуры, так и от осадков. Точная датировка возможна только для ежегодных слоистых осадков. Кроме того, осадочные породы могут пострадать от вторичных изменений из-за взаимодействий минеральных пор и рекристаллизации [Kalugin et al., 2007].

151

Каждый архив имеет свои преимущества и недостатки. Климатические реконструкции, основанные только на одном архиве, могут быть предметом систематических ошибок. Для некоторых северных районов, например, сообщалось о явлении расхождения трендов температуры по данным ширины годичных колец деревьев [Wilmking et al., 2005; D'Arrigo et al., 2008]. Более надежные климатические реконструкции можно достичь путем объединения различных косвенных источников, поскольку отклонения между архивами климатической информации могут выявлять неопределенности, в то время как общие тенденции указывают на высокую степень статистической достоверности для реконструкции. Несмотря на очевидные преимущества многопараметрического подхода, было предпринято несколько попыток для создания масштабных реконструкций для всего Северного Полушария [Jones et al., 1998; Mann et al., 1998; Mann, Jones, 2003; Etien et al., 2009], а так же, с привлечением параметров по ширине годичных колец, с использованием, например, стабильных изотопов, ширины годичных колец деревьев и максимальной плотности поздней древесины [Скомаркова и др., 2006; Gagen et al., 2007; Кирдянов и др., 2008; Hilasvuori et al., 2009; Kress et al., 2010; Sidorova et al., 2010, 2013; Churakova (Sidorova) et al., 2014]. Причина небольшого числа исследований в данном направлении могут быть обоснованы методологическими проблемами, такими как различное временное разрешение (погодичное временное разрешение в кольцах деревьев, как правило, отличающееся от ледниковых кернов и озерных отложений) и различной сезонной информацией (весеннее - летний климатический сигнал в древесных кольцах), однако, возможно разная сезонность содержится и в других косвенных источниках палеоклиматической информации.

Реконструкции по температуре воздуха, и осадков доступны для высокогорного Алтая по данным ледникового керна Белуха [Eichler et al., 2009] и донных отложений из озера Телецкое [Kalugin et al., 2007].

Впервые полученные длительные реконструкции по температуре воздуха июля, дефицита упругости водяного пара в июне и продолжительности солнечного сияния июля, полученные по данным стабильного изотопа кислорода, а также атмосферных осадков июля в целлюлозе лиственницы сибирской, из района Монгун тайга, Алтай дают уникальную возможность сопоставления и выявления общих климатических факторов, содержащихся в разных климатических архивах. Данный многопараметрический подход позволяет объединить все эти независимые палеоклиматические архивы для высокогорного Алтая.

Длительные климатические записи и метеорологические наблюдения о влиянии изменения окружающей среды на высокогорные лесные экосистемы и ледники необходимы для калибровки косвенных источников с низким временным разрешением. Однако, самые длинные метеорологические наблюдения проводились на станциях, расположенных близко к городам, а также расположенным на гораздо более низких высотах, например, метеостанция Барнаул (с 1834 года, 184 м. н. у. м.), по отношению к исследуемым высокогорным районам (2,200 м. н. у. м.).

Цель многопараметрического подхода состоит в предоставлении климатической информации разных параметров древесного кольца, таких как: ширина годичного кольца (TRW), максимальная плотность поздней древесины годичного кольца (MXD), толщина клеточной стенки (CWT), соотношение стабильных изотопов углерода (¹³C/¹²C) и кислорода (¹⁸O/¹⁶O) и проведение сравнительного анализа с другими независимыми архивами, такими как: ледниковые керны и озерные отложения для выявления и описания более точных изменений климата и окружающей среды в высокогорных районах, на примере Горного Алтая. Чтобы сравнить записи деревьев с другим независимым климатическим архивом были использованы ранее опубликованные реконструкции температуры для марта-ноября [Eichler et al., 2009] и июня-августа [Henderson et al., 2006], полученные по содержанию δ^{18} О в ледниковом керне Белуха (49° с. ш., 86° в. д., 4062 м. н. у. м). Реконструкции по среднегодовой температуре воздуха и осадкам, полученных по данным донных отложений озера Телецкое (51° с. ш., 40° в. д., 434 м. н. у. м) [Kalugin et al., 2007] были использованы для сопоставления с новыми хронологиями, полученными для кислорода и углерода в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской для периода с 520 по 2016 гг. н. э. Рассматриваемые хронологии находятся на расстоянии около 300 км. друг от друга, а также от места дендро-изотопного исследования (Рисунок 2. 1).

8. 1. 1. Изменчивость радиального прироста древесных растений



Погодичные (Рисунок 8. 1 а) и сглаженные 11-летним окном Хэмминга (Рисунок 8. 1 б) параметры ширины годичных колец деревьев представлены на Рисунке 8. 1.

Рисунок 8. 1. Погодичные (а) и сглаженные 11-летним окном Хэмминга (б) хронологии по ширине годичных колец деревьев (TRW), б) максимальной плотности поздней древесины (MXD), (в) δ¹³С и (г) δ¹⁸О в целлюлозе и (д) толщине клеточной стенки годичных колец лиственницы сибирской.

Погодичные хронологии параметров годичного кольца значимо коррелируют между собой в диапазоне от r=0,5 до r=0,9 (p<0,05). Несмотря на синхронности параметров, существуют так же различия, объясняемые характерно выраженной сезонностью каждого параметра. Так, хронологии, полученные по углероду и кислороду, показывают разнонаправленные тренды, что так же выявлено в сглаженных хронологиях (Рисунок 8. 1 б, серая и красная линии). Данная разнонаправленность трендов может быть объяснена влиянием мерзлоты, в частности таяния мерзлоты при увеличении летних температур, уменьшением июльских осадков и увеличении процессов эвапотрансприрации в данном районе исследования.

8. 1. 2. Соотношение ¹⁸O/¹⁶O в целлюлозе годичных колец деревьев и в ледниковом керне Белуха

Реконструкция температуры воздуха марта-ноября, выполненная по данным δ^{18} О в ледниковых кернах Белухи, была сопоставлена с реконструкциями по температуре июля (Рисунок 8. 2) и длительности солнечного сияния, полученными по содержанию δ^{18} О в целлюлозе лиственницы сибирской. Ранее было выявлено, что в течение периода с 1250 по 1850 гг., δ^{18} О в ледниковом керне Белуха значимо коррелирует с солнечной активностью, выявляя высокие и низкие значения колебаний солнечной активности [Eichler et al., 2009].

Реконструированное осадконакопление в виде таяния, полученное из слоя ледникового керна Белухи были использованы в качестве источника информации об изменении атмосферных осадков за период с 1818 по 2001 гг. [Henderson et al., 2006]. Наибольшее количество осадков по данным ледникового керна было выявлено для 1830 г. и 1950 г. Данная хронология была сопоставлена с реконструкциями по атмосферным осадкам июля, температуре воздуха июля, дефициту упругости водяного пара в июне, полученным по данным изотопа кислорода в целлюлозе лиственницы сибирской (Рисунок 8. 2).



Рисунок 8. 2. Реконструкция температуры воздуха июля (черная линия), полученная по содержанию изотопа кислорода в целлюлозе лиственницы сибирской в сопоставлении с реконструкцией температуры воздуха марта-ноября, полученная по содержанию изотопа

кислорода в слоях ледникового керна Белуха [Eichler et al., 2009]. Хронологии сглажены 41-летним окном Хэмминга.

Из графиков, представленных на рисунке 8. 2 можно видеть значимую согласованность реконструкций по температуре воздуха до 1750-х годов (r = 0,4; p<0,05). Далее с 1950-х наблюдается значимая разница в трендах до 4°С. Вероятнее всего, обусловленное сезонностью косвенных источников информации и калибровкой моделей по метеорологическим данным. Так, для получения калибровочной модели δ^{18} О в ледниковом керне Белуха, использовалась температура марта-ноября метеостанции Барнаул. Выбор данной станции был основан на длительности ряда наблюдений, столь необходимым для корректировки ледниковых кернов. Однако, в случае реконструкций, полученных по данным δ^{18} О целлюлозы лиственницы сибирской калибровка проводилась с выбором близлежащей горной метеостанции (Таблица 2. 1). Разница высотного градиента и сезонности частично объясняет разницу между полученными реконструкциями.

Реконструкция осадков июля, полученная по содержанию стабильного изотопа углерода в целлюлозе годичных колец лиственницы и реконструкцией по температуре, полученной по ледниковому керну Белуха показывают разнонаправленные тренды в течение современного периода (Рисунок 8. 2). Увеличение температуры, зафиксировано ледниковым керном в течение марта-ноября, в то время как снижение атмосферных осадков июля зафиксировано в целлюлозе годичных колец деревьев. Хронологии показывают разнонаправленные тренды с коэффициентом корреляции для общего периода исследования с 1250 по 2000 гг. (r = -0,73; p < 0,05).



Рисунок 8. 3. Реконструкция осадков июля, полученная по содержанию δ^{13} С в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской [Siodorova et al., 2012] и δ^{18} О ледникового керна Белуха [Eichler et al., 2009].

Разнонаправленные тренды реконструированных данных по температуре воздуха в ледниковом керне Белухи и в реконструированных данных, полученных по температуре и осадкам июля в целлюлозе годичных колец лиственницы объясняется смешанными сигналами источников воды (например, мерзлотная вода и осадки) и влиянием атмосферной циркуляции, зафиксированной в δ^{18} О целлюлозы. Увеличение температуры марта-ноября по данным ледникового керна [Eichler et al., 2009] зафиксировано ранее, по сравнению с данными, полученными по целлюлозе, что может быть объяснено откликом деревьев лиственницы на таяние мерзлоты в следствии роста температур и уменьшения осадков.

Временные изменения в ледниковом керне Белуха в процентном отношении таяния слоев (МТ) были проинтерпретированы как косвенный источник об изменении летней температуры воздуха июня-августа для периода с 1818 по 2001 гг. [Henderson et al., 2006]. Сравнительный анализ с реконструкцией VPD июня (r = -0,26; p < 0,01) и температурой воздуха июля (r = -0,26; p < 0,01), а также осадками июля (r = -0,54; p < 0,01), рассчитанными по содержанию кислорода в целлюлозе показывает отрицательно значимые связи с

реконструкцией температуры воздуха июня-августа, полученной по МТ для периода с 1818 по 2001 гг. (Рисунок 8. 4).



Рисунок 8. 4. Реконструкция дефицита упругости водяного пара в июне, полученная по содержанию δ¹⁸О целлюлозы и реконструкция температуры июня-августа, полученная по процентному отношению таяния слоев (МТ) ледникового керна Белуха для периода с 1818 по 2001 гг. Хронологии сглажены 11-летним окном Хэмминга.

Из рисунка 8. 4. видно, что обе хронологии имеют общие амплитуды колебаний до 1950-х, после чего реконструкция летней температуры, полученная по ледниковому керну, показывает дальнейший рост, а реконструкция по VPD значительно уменьшается после 1960х, что свидетельствует о теплых и влажных условиях, и находит тому подтверждение в увеличении количества осадков для данного периода (Рисунок 8. 5).



Рисунок 8. 5. Реконструкция по осадкам июля, полученная по содержанию δ¹³C в сопоставлении с реконструкцией температуры воздуха июня-августа, полученная по процентному отношению таяния слоев (МТ) ледникового керна Белуха для периода с 1818 по 2001 гг. Хронологии сглажены 11-летним окном Хэмминга.

8. 1. 3. Сравнительный анализ климатических реконструкций по данным содержания стабильных изотопов в годичных кольцах деревьев и донных отложений оз. Телецкое

Телецкое озеро расположено в таежной зоне северо-восточного Алтайского края (51° с. ш., 87' в. д., 434 м. н. у. м.). Озеро непрерывно накапливает осадки. Больше, чем половина воды, накапливаемой озером, обеспечивается в течении весны и в результате летних наводнений после сезонного таяния снега. Как правило, климат в озере является континентальным [Selegei et al., 2001]. Влияние Сибирского Высокогорья преобладает зимой, а западное влияние возрастает летом. Керны донных отложений озера Телецкого были собраны на глубине 325 м. [Kalugin et al., 2007]. Они были проанализированы при помощи рентгеновской флуоресценции с синхротронным излучением (XRF-SR) с шагом 0,2 мм., что соответствует уникальному разрешению 2-3 месяца [Калугин и др., 2007]. Стандартные процедуры с дискретной под выборкой на 0,5 см. были датированы при

помощи гамма-спектрометрией 137 Cs и 210 Pb для самых верхних слоев 10 см., а также с использованием радиоуглеродного датирования 14 C для нижних слоев керна. Оба метода показали одинаковую скорость накопления около 0,9 мм., интерпретируя результат как осадконакопление [Kalugin et al., 2007].

Реконструкции среднегодовой температуры воздуха и атмосферных осадков были рассчитаны на основе линейной возрастной модели, которая сама по себе не предоставляет точную датировку, например, серию деревьев, потому что толщина слоев меняется с каждым годом [Kalugin et al., 2007]. Функция температуры T = f (Br, XRD, Sr / Rb) была откалибрована с использованием данных метеорологической станции Барнаул [Kalugin et al., 2007]. Данные по Sr / Rb, Br, XRD значимо коррелировали между собой (r = 0,71; r = 0,87; r = -0,84; *p*<0,05), соответственно, для периода 1840-1991 гг. н. э. Реконструкция палеотемпературы, полученная для последних двух тысячелетий, указывают на аналогичные значения XX века (Рисунок 8. 6).



Рисунок 8. 6. Реконструкция по среднегодовой температуре воздуха (красная линия), полученная по донным отложениям оз. Телецкое [Kalugin et al., 2007; Бабич и др., 2016] в сопоставлении с реконструкцией температуры июля (синяя линия), полученной по содержанию δ¹⁸О в целлюлозе представлены за общий период исследования 520-1996 гг. Хронологии сглажены 41-летним окном Хэмминга.

Ярко выраженный пик потепления зафиксирован донными отложениям оз. Телецкое в период средневекового потепления IX-X и XX вв (Рисунок 8. 7). Причем современное потепление в донных отложениях отразилось ранее, чем в целлюлозе лиственницы сибирской. Малый ледниковый период представлен в обеих хронологиях, с более низкими температурами в озерных отложениях, что обусловлено колебаниями среднегодовой температуры, а не летней, как в случае целлюлозы. Однако, несмотря на различия, хронологии показывают синхронные периоды и статистически значимые связи (r=0,15; p<0,05) за общий период наблюдений с 520 по 1996 гг.



Рисунок 8. 7. Реконструкция по среднегодовым осадкам (черная линия), полученная по донным отложениям оз. Телецкое в сопоставлении с реконструкцией атмосферных осадков июля (синяя линия), полученной по содержанию δ^{13} С в целлюлозе за общий период исследования с 520 по 1991 гг. Хронологии сглажены 41-летним окном Хэмминга.

Обе реконструкции по осадкам значимо согласуются между собой по всей длине ряда (r=0,17; *p*<0,05) и показывают снижение осадков с 1800-х указывая на аридизацию района исследования.

8. 2. Ограничения многопараметрического подхода

Многопараметрический подход с включением ширины годичного кольца, МХD, CWT, δ^{13} C и δ^{18} O в целлюлозе, а также привлечением других косвенных источников, несущих в себе информацию об изменении климата и условий окружающей среды значимо согласуются между собой в длительных колебаниях, в то время как в погодичных колебаниях несут различную сезонную информацию о климатических изменениях. В частности, это наблюдалось для реконструкции температуры воздуха июля и дефицита упругости водяного пара в июне, полученных по содержанию δ^{18} O в целлюлозе годичных колец лиственницы сибирской, произрастающей в районе Монгун тайга. Так, погодичная изменчивость была схожа с другими параметрами, тогда как длительные тренды в сглаженных хронологиях были противоположными. Это подчеркивает общую сложность климатических реконструкций из разных архивов, где часто не все частоты сезонного характера могут быть восстановлены с высокой достоверностью.

Например, хорошо известна проблема получить длительную изменчивость климата по ширине годичных колец деревьев. Потому что корректировки возрастного тренда могут удалить информацию об экофизиологических изменениях, например, в случае RCS-метода [Briffa et al., 1996], который достаточно часто применяется для сохранения длительного климатического сигнала [Сидорова, 2003; Naurzbaev et al., 2002; Grudd, 2002; Esper et al., 2002]. Различия между высоко- и низкочастотной состовляющих, содержащихся в $\delta^{18}O$ может быть объяснена влиянием разных климатических условий. Например, разной сезонностью и различным откликом к среднегодовой температуре воздуха и осадкам, которые в значительной степени проявляются в длительных годовых колебаниях, по сравнению с внутрисезонной изменчивостью. Расходящиеся тренды температурных изменений в течение современного периода, зафиксированные в ледниковом керне Белуха, а также донных отложениях оз. Телецкое, и целлюлозе лиственницы сибирской указывают на то, что хронологии могут содержать смешенный сигнал, не только температуры, но и осадков. Более того, δ^{18} О в целлюлозе годичных колец содержит в себе экофизиологическую информацию о внутренних фракциях, которых связаны с обогащением H₂¹⁸O, в следствие влияния влажности воздуха и процессами транспирации.

1. Реконструкция, основанная только на одном параметре, может быть недостаточно точной для калибровочного периода из-за одновременного влияния нескольких факторов: температуры и изменения CO₂.

2. Несмотря на многочисленные факторы, оказывающие влияние на процессы фракционирования и насыщения δ^{18} О, полученная реконструкция по температуре воздуха июля выявляет общие периоды потепления и похолодания с температурными реконструкциями по ледниковым кернам и донным отложениям. Период современного потепления зафиксирован ледниковыми кернами и донными отложениями ранее, чем годичными кольцами, что может быть объяснено разной сезонностью и влиянием дополнительного фактора, например, деградации многолетней мерзлоты.

3. Реконструкции, полученные по среднегодовым осадкам оз. Телецкое и осадкам июля по данным δ¹³С в целлюлозе годичных колец, показывают синхронность в снижении осадков в течение современного периода, свидетельствуя о нарастании засушливых условий, которые могут привести к природной аридизации.

ГЛАВА 9. Экофизиологический отклик хвойных из высокоширотных и высокогорных районов Евразии на мощные стратосферные извержения вулканов

Стратосферные вулканических извержения оказывают значимые последствия для радиационного баланса, атмосферных температур и региональных погодных условий, что приводит в свою очередь к глобальным климатическим изменениям. Извержения вулканов также приводят к изменениям в химии атмосферы (Рисунок 9. 1), включая экологически важные атмосферные эффекты, такие как глобальное нарушение озонового слоя [Robock, 2000].



Рисунок 9. 1. Схематическая диаграмма извержения вулкана и взаимодействие с окружающей средой. Диаграмма видоизменена после Бронниман с соавторами [Brönnimann et al., 2016].

Глобальные климатические изменения, связанные с извержениями стратовулканов, чаще всего приводят к охлаждению нашей планеты от 0,6°С до 1,3°С в течение нескольких лет после события [Lacis et al., 1992], как, например, извержение 1257 г. – Самалас; 1600 – Уянапутина; 1815 – Тамбора и 1991 – Пинатубо (Таблица 9. 1) [Robock, 2000; Zielinski et al., 2000; Churakova (Sidorova) et al., 2014; Guillet et al., 2017].

Таблица 9. 1. Воздействие известных и неизвестных стратосферных вулканических извержений на лиственницы, произрастающие в Сибири.

Период	Год/месяц/день	месяц/день Название		Оптическая	Местоположение	Литература		
	извержения	вулкана	вулканичес	глубина	координаты			
			кой					
			активности					
			(VEI)					
516-560	535/?/?	Неизвестный	6+?	?	Неизвестный	Stothers, 1994		
	540/?/?	Неизвестный	?	?	Неизвестный	Sigl et al., 2014		
1242-1286	1257/09/?	Самалас	7	0,39	Индонезия	Stothers, 2000;		
						Sigl et al., 2015		
1625-1675	1640/12/?	Паркер	5	0,18	Филлипины,	Zielinski et al., 2000		
					6°с. ш., 124° в. д.			
1790-1835	1815/04/10	Тамбора	7	0,20	Индонезия,	Zielinski et al., 2000		
					8°ю. ш., 118° в. д.			
1950-2004	1991/06/12	Пинатубо	6	0,12	Филлипины,	Zielinski et al., 2000;		
					15° с. ш., 120° в. д.	Sigl et al., 2013		

В то же время, уменьшение осадков было выявлено по данным климатических моделей в Европе и Сибири [Robock, Yuhe, 1994; Gillet et al., 2004; Iles et al., 2014; Wegmann et al., 2014]. Извержения вулканов могут также приводить к зимнему потеплению на северных континентах [Robock, Mao, 1992], в следствии положительной фазы арктических (AO) и северо - атлантических (NAO) атмосферных циркуляций [Groisman, 1992; Robock, Mao, 1992].

Исторические документы могут предоставить ценную информацию об извержениях вулканов и последующих климатических изменениях [Stothers, 1999]. Включения пыли и кислоты в погодичных слоях ледниковых кернов послужили основанием для развития теории о воздействии вулканов на изменение климата [Zielinski et al., 1994]. Точные календарные датировки обеспечили статистически достоверную основу для использования колец деревьев как точных палеоклиматических архивов, содержащих информацию о мощных вулканических извержениях [LaMarche, Hirschboeck, 1984; Briffa et al., 1998; Hughes et al., 1999; D'Arrigo et al., 1999, 2008, 2013; Krakauer, Randerson, 2003; Сидорова и др., 2005; Salzer, Hughes, 2007; Churakova (Sidorova) et al., 2014].

Изменения параметров годичных колец деревьев содержат информацию об изменении климатических факторов И окружающей среды после мощных стратосферных вулканических извержений. Многие из этих интерпретаций основаны на том факте, что ширина и плотность поздней древесины годичных колец деревьев, произрастающих вблизи полярных или верхних границ леса, содержат значимую информацию о летней температуре [Fritts, 1976; Schweingruber, 1996; Hughes et al., 1999; Vaganov et al., 2006]. Однако, меньшее внимание уделялось изотопному составу годичных колец деревьев в те годы, когда они могут подвергаться влиянию отдаленных стратосферных вулканических извержений. Отдельные научные работы были проведены по исследованию годичных колец на элементный состав, связанных как с локальными, так и с очень отдаленными извержениями вулканов [Kenan et al., 2009]. Некоторые исследования, использующие изотопные сигналы в кольцах деревьев, выявили физиологические отклики деревьев на извержения вулканов из средних широт [Battipaglia et al., 2007] и субарктических районов Канады [Gennaretti et al., 2017]. Однако, исследование отклика деревьев, произрастающих в высокоширотных и высокогорных районах Евразии на мощные стратосферные извержения с привлечением

параметров годичных колец таких как: TRW, MXD, CWT, δ^{13} C и δ^{18} O в целлюлозе годичных колец лиственниц является уникальным как для Российского, так и для мирового уровня [Churakova (Sidorova) et al., 2018]. Сравнение климатического и экофизиологического сигналов между параметрами годичного кольца и содержанием стабильных изотопов в целлюлозе годичных колец деревьев лиственниц для высокоширотных и высокогорных районов Евразии позволит выявить вариацию продолжительности вулканических событий, их интенсивности, а также однородности/неоднородности климатического сигнала, зафиксированного деревьями для этих районов исследования.

9. 1. Аномалии, зафиксированные параметрами годичных колец деревьев и стабильными изотопами после стратосферных вулканических извержений

Основываясь на ранее построенных длительных древесно-кольцевых хронологиях для северо-востока Якутии [YAK, Hughes et al., 1999; Sidorova, Naurzbaev, 2002; Sidorova, 2003; Hughes et al., 2018], востока Таймыра [TAY, Naurzbaev et al., 2002] и Алтая [ALT, Myglan et al., 2012] были выделены периоды, характеризующие значительным снижением прироста (Рисунок 9. 2).



Рисунок 9. 2. Схематическая карта местоположения районов исследования на северовостоке Якутии (YAK), востоке Таймыра (TAY) и Алтае (ALT), обозначены треугольниками. Местоположение стратосферных вулканических извержений показано на карте черными окружностями (см. также Таблица 9. 1). Фотографии с изображением долгоживущих деревьев лиственниц *Larix cajanderi* Mayr., YAK; *Larix gmelinii* Rupr., TAY; и *Larix sibirica* Ldb, ALT. 2000 – летние хронологии по ширине годичных колец деревьев для YAK [Hughes et al., 1999; Sidorova, Naurzbaev, 2002; Sidorova, 2003; Сидорова и др., 2005; Hughes et al.,

2018], TAY [Naurzbaev et al., 2002] и ALT [Мыглан и др., 2012] выделены синим, зеленым и красным цветом, соответственно.

Периоды 516-560 гг., 1242-1286 гг., 1625-1675 гг., 1790-1835 гг. и 1950-2000 гг. были измерены и проанализированы для ширины годичного кольца (TRW), максимальной плотности поздней древесины (MXD), толщины клеточной стенки (CWT), содержания стабильных изотопов углерода (δ^{13} C) и кислорода (δ^{18} O) в целлюлозе годичных колец лиственниц. Применённый метод наложенных эпох [Chree, 1913] 15 лет до и 15 лет после события были проанализированы и сопоставлены для каждого параметра годичного кольца и каждого района исследования отдельно (Рисунок 9. 3).

Было выявлено, что практически все параметры для изучаемых районов исследования показывают снижение данных на следующий год, после извержения, либо с запаздыванием в два года. Наибольшее снижение данных наблюдалось для хронологий, полученных по СWT для YAK и TAY сразу после извержения и двумя годами позже для ALT (Рисунок 9. 3).

Содержание δ^{18} О в целлюлозе годичных колец показывает значительное снижение данных в первый год после извержений для YAK и в течение последующих двух лет для TAY и ALT. Интересен тот факт, что снижение данных по содержанию δ^{13} С и δ^{18} О были незамедлительными в 536 г. н.э., что не имеет аналогов за последние 1500 лет. Более детально рассмотрим события 536 г. н.э., 1257 г. н. э., и 1991 г. н.э., для всех параметров и районов исследования.



Рисунок 9. 3. Нормированные значения для параметров годичного кольца (δ¹³C – красная, δ¹⁸O – синяя, TRW – зеленая, CWT – серая, MXD – черная линии) для каждого вулканического события (535 г., 1257 г., 1640 г., 1815 г., 1991 г. н. э.), рассчитанные методом наложенных эпох (15 лет до и после извержения) для северо-востока Якутии (YAK), востока Таймыра (TAY) и Алтая (ALT).

9. 1. 1. Климатические аномалии после стратосферных извержений 535 г. и 540 г. н. э.

Понимание последствий извержений вулканов, зафиксированных в годичных кольцах деревьев, включая несколько параметров годичные кольца, полученных для 536 г. н.э. особенно необходимо, так как годичные кольца позволяют с точностью до года определить календарную дату, что, является затруднительным для других палеоклиматических косвенных источников информации (ледниковые и озерные керны).

Многие работы посвящены исследованию пылевой завесы 536 г. н. э. в следствии неизвестного события [Baillie, 1994; Zielinski et al., 1994; Briffa et al., 1998; Stothers, 1999; D'Arrigo et al., 2001; Rigby et al., 2004). Данное событие характеризовалось одним из наиболее

холодных периодов в северном полушарии за последние два тысячелетия [Stothers, 1999; Briffa et al., 1998; Larsen et al., 2008, Churakova (Sidorova) et al., 2014; Büntgen et al., 2016], хотя данные по кислотности, полученные по ледниковым кернам Гренландии показывают гораздо более сильные пики в течение прошлых веков [Plummer et al., 2013]. Предполагается, что сухие вулканические туманы и равномерно распределенные частицы пыли в атмосфере, порожденные событиями 530-540-х годов, в частности, в течение 536 г. и 540 г. н.э., охлаждают климат, частично блокируя поступление солнечного излучения и нарушая характер атмосферных циркуляций. Эпидемиологические последствия вулканических сухих туманов, обнаруженных в Европе и на Ближнем Востоке, были исследованы с использованием исторических отчетов, дополненных данных по древесным кольцам и измерений кислотности полярного льда [Stothers, 1999; Larsen et al., 2008; Guilie et al., 2017]. Эти эффекты были приписаны Стоверс [Stothers, 1999] к «Неизвестному» вулкану, который, как считается, начал извержение в марте 535 года, скорее всего, в северных широтах. В европейских хронологиях, полученных по ширине годичных колец деревьев было показано уменьшение радиального прироста деревьев в течении по меньшей мере 10 лет после события 535 года [Baillie, 1994; Stothers, 1999]. Альтернативная гипотеза предполагает, что космическое явление (астероид или комета) могло вызвать сильные климатические изменения в это время [Rigby, 2004]. Данные по содержанию сульфатов в ледниковом керне Гренландии для этого периода отсутствуют и показывают увеличение концентрации только в предполагаемом 529 году [Zielinski, 1994]. Однако, недавние исследования [Gao et al., 2008; Larsen et al., 2008, Siegl et al., 2013] показали большое количество отложений вулканической серной кислоты в ледниковых кернах Гренландии и Антарктики для события 536 г., которые поддерживают изначальную гипотезу об извержении вулканов. Благодаря еще более позднему анализу записей кислотности из ледниковых кернов Гренландии и Антарктики возникает вероятность того, что за несколько лет до 535 г. произошло два или, возможно, три различных извержений вулканов [Plummer et al., 2013; Sigl et al., 2013]. В частности, Сигл с соавторами [Sigl et al., 2013] выявил по данным ледниковых кернов несколько событий как в Антарктиде, так и в Гренландии, увеличивая вероятность того, что их климатические эффекты могут иметь глобальный характер. Исследование Сигл с соавторами [Sigl et al., 2013] сообщают о различных событиях, начиная с 528,7 / 529,8 (Антарктика / Гренландия) и 531,2/532,5; 530,2 / 531,5 и 534,6 / 535,0. Оба ряда имеют высокие оценки осаждения вулканического сульфата в Гренландии, чем в Антарктиде. Обозначим их «извержениями 532 г. и 535 г. н. э.», создавая связь с событиями зафиксированными параметрами годичного кольца, с целью верификации события. Сигл и соавторы [Sigl et al., 2013] сообщает о третьем событии с меньшим осаждением вулканического сульфата только по данным ледникового керна Гренландии, начиная с 539,5 и заканчивая 540, так называемое «извержение 540 г. н. э.», также делая предварительную ссылку на данные, полученные из высокоширотных районов Евразии [Churakova (Sidorova) et al., 2014], которые описаны ниже. Очевидные улучшения в датировке ледниковых кернов [Larsen et al., 2007; Plummer et al., 2013; Sigl et аl., 2013] в точности хронологии осаждения вулканической серы и, следовательно, вулканических лет, полученных из этих данных, позволили произвести пересмотр так называемого глобального катастрофического события 535/536 гг. н. э.

Рассмотрим кластер извержений, различающихся примерно на 2-3 года друг от друга, что способствует осаждению вулканического сульфата в ледниковых кернах в течение 3летнего периода, заканчивающегося непосредственно перед 536 г. н. э. Третье извержение, по-видимому, произошло пять лет спустя, в 540 г. н. э.

Предположим, что кластер вулканических событий, центрированный в 535 г. н. э., привел к понижению радиального роста деревьев из-за некоторой комбинации факторов, таких как, уменьшения солнечного излучения, снижения температуры и снижения дефицита упругости водяного пара как для высокоширотных (YAK, TAY), так и высокогорных (ALT) районов Евразии.



Рисунок 9. 4. Фотографии анатомических срезов для 536 г., выделены красным цветом для северо-востока Якутии (YAK) (а), восточного Таймыра (TAY) (б) и Алтая (ALT) (в). Фото М. В. Фонти (Брюхановой) [Churakova (Sidorova) et al., 2014].

Используя древесно-кольцевые хронологии (TRW), полученные для YAK, TAY и ALT (Рисунок 9. 2) был выбран период с 520 г. до 560 г. н. э. и проанализирован для других параметров: максимальной плотности, толщины клеточной стенки и стабильных изотопов углерода и кислорода (Таблица 9. 1, Рисунок 3 а). Во время процедуры перекрестного датирования было найдено, что в некоторых образцах YAK и TAY отсутствовало кольцо 536 года. Однако, для YAK были использованы четыре древесных образца, которые содержали узкое кольцо для 536 г. Данные образцы были использованы для построения TRW, CWT, δ^{13} C и δ^{18} O. Для YAK и TAY наблюдались отклонения (-2 σ) относительно среднего значения для ширина годичного кольца (TRW) и индекса ширины годичного кольца (TRWI) для 536 г. и 541 г. н. э. (Рисунок 9. 5). Хронология TRW для ALT имеет относительно широкие кольца (до 0,9 мм) в начале периода. Однако, после 532 г. н. э. TRW для ALT резко снизилась до ~

0,40 мм., и после 536 г. н.э. до 0,16 мм., с наименьшим значением в 539 г. н. э. (-1,9 σ) (Рисунок 9. 5).

Обе хронологии для TRW, полученные для высокоширотных районов TAY и YAK имеют низкую среднюю TRW по сравнению с высокоширотным ALT (Приложение, Таблица 9. 2). TRW хронологии по ALT (Рисунок 9. 5) показывают выраженное снижение радиального прироста в течение 24 лет по сравнению с TAY (17 лет) и YAK (11 лет) (Рисунок 9. 4).

Все погодичные параметры древесного кольца для участков ҮАК, ТАҮ и АLT достоверно коррелируют друг с другом на каждом участке исследования. Большинство из них продемонстрировали значительные связи даже между удаленными районами исследования, расположенными на расстоянии от 1400 до 3500 км друг от друга (Таблица 9. 2), что свидетельствует о значительном глобальном событии в обширном регионе Сибири в течение 536 г. н. э. Фотографии образцов с поврежденными клеточными структурами в кольце для 536 г. представлены на рисунке 9. 4 (а-в). К сожалению, оставшиеся образцы сегментов деревьев из ТАҮ, которые использовались для анализа стабильных изотопов, были разрушены, когда они были отправлены обратно в лабораторию для анатомического анализа. Таким образом, из этого материала невозможно было получить четкое изображение кольца 536 г. В результате для ТАҮ отсутствует 536 год и толщина клеточной стенки (Рисунок 9. 4 б). Образцы из ҮАК и ALT были успешно проанализированы с зафиксированным событием 536 г. (Рисунок 9. 4 а, в).

Анализ изображений анатомической структуры кольца показал, что деревья значимо реагируют на экстремальные холодные климатические условия, образуя всего лишь две клетки в вегетационный период, в случае YAK (Рисунок 9. 4 а) или образуя морозобойные кольца в образцах лиственницы сибирской [Glerum, 1966] для ALT (Рисунок 9. 4 в). В течение 536 г. были сформированы только две клетки для YAK и четыре для ALT относительно средних значений 11 или 25 клеток в течение вегетационного периода (Рисунок 9. 4 а, в).

Хронология CWT была построена на основе четырех образцов деревьев для каждого района исследования. CWT хронология для района Якутии (YAK) показывает снижение (до -2,1 σ) для 536 г. и 541 г. н. э., а для Алтая (ALT) среднеквадратическое отклонение для 536

г. и 537 г. н. э. составило (-2,9 σ). Морозобойные кольца в образцах лиственницы сибирской из ALT были выявлены для 536 г. и 538 г. н. э. Снижение СWT длилось до 541 г. (Рисунок 9. 5 в).



Рисунок 9. 5. Хронологии по индексам ширины годичного кольца (TRWI) (a), ширина годичного кольца (TRW) (б), толщина клеточной стенки (CWT) (в), δ^{13} C (г) и δ^{18} O (д) в целлюлозе годичных колец по северо-востоку Якутии (YAK), востоку Таймыра (TAY) и Алтаю (ALT) для периодов с 520 по 560 гг. н. э.

Таблица 9. 2. Статистические значения для ширины годичного кольца (TRW), толщины клеточной стенки (CWT) и содержания стабильных изотопов δ¹³C, δ¹⁸O в целлюлозе.

Район	TRW [MM]				CWT [µm]			δ ¹³ C [‰]				δ ¹⁸ Ο [‰]				
	Среднее	SD	Мин	MXD	Среднее	SD	Мин	MXD	Среднее	SD	Мин	MXD	Среднее	SD	Мин	MXD
YAK	0,28	0,10	0,08	0,66	3,57	0,64	2,04	4,74	-23,9	0,66	-26,05	-22,56	19,15	0,60	17,68	20,48
TAY	0,25	0,11	0,03	0,49	3,28	0,49	1,75	4,15	-25,4	0,73	-26,76	-23,78	22,08	0,73	20,76	23,98
ALT	0,50	0,22	0,16	0,97	3,12	0,54	1,47	3,97	-22,8	0,42	-23,52	-21,66	28,11	1,67	19,99	30,66

Средние и минимальные значения СWT были определены для всех объектов исследования для периода с 520 г. до 560 г. н. э. (Таблица 9. 2). Средние, минимальные и максимальные значения CWT для периода 520 - 560 гг. н. э. являются самыми низкими для ALT, в частности, для 536 г. н. э. являются самыми низкими для YAK. Значения δ^{13} C хронологий в целлюлозе для YAK и TAY, но не для ALT, показывают сильное снижение в 536 г. (-3,3 σ и -1,7 σ) соответственно. Значения δ^{13} C для YAK показывают значительное снижение начиная с 537 г. н.э. с уменьшением для 541 г., а для TAY, значения углерода оставались на низком уровне более десяти лет с минимальным значением для 538 г. н. э. Хронологии по содержанию углерода, построенные для YAK, TAY и ALT, показали различия в средних значениях до 2,6 ‰ (Рисунок 9.5 д).

Чрезвычайно низкие значения для δ^{18} О для 536 г. н. э. регистрировались с разностью 8‰ и стандартным отклонением (-4,8 σ) относительно среднего значения для периода с 516-560 г.г. н.э. для высокогорного Алтая (ALT) (Рисунок 9. 3 д, Таблица 9. 2). Низкие значения были обнаружены и для других районов исследования: ТАҮ (-1,9 σ) и ҮАК (-1,7 σ) (Рисунок 9.5 д). 9. 1. 2. Климатические аномалии после стратосферного извержения вулкана Самалос 1257 г. н. э.

Извержение вулкана Самалос, произошедшее в Индонезии в 1257 году [Stothers, 2000; Lavigne et al., 2013; Guillet et al., 2017] относится к числу крупнейших вулканических извержений за последние тысячелетие с осаждением серы в ледниковых кернах, в два раза превышающих объем извержения Тамборы в 1815 году [Sigl et al., 2015]. Стратиграфический и седиментологический анализы отложений подтверждают высокую активность извержения вулкана Самалос (индекс вулканической активности VEI = 7) с выбросом магмы ≥40 км³ [Lavigne et al., 2013]. Тем не менее, климатический отклик на событие "Самалас" активно обсуждается для пересмотра климатических моделей [Mann et al., 2012; Stoffel et al., 2015]. По данным обобщенных древесно-кольцевых хронологий для Северного полушария (NH) было выявлено, что 1258 г. и 1259 г. н. э. были самыми холодными годами прошлого тысячелетия [Сидорова и др., 2005; Stoffel et al., 2015]. Однако похолодание в Северном Полушарии было пространственно-неоднородным в, частности в Западной Европе, Сибири и Японии. Предполагается, что в Северной Америке, климат, модулируется Эль-Ниньо, Южным колебанием. Извержение Самалос, усугубило существующий вулкана сельскохозяйственный кризис в Японии и Англии, но тем неменее не вызвало голод [Guillet et al., 2017]. Однако, в Сибирских хронологиях извержение Самалос отразилось в 1258 г. н. э., главным образом для YAK и ALT, а в 1259 гг. для TAY (Рисунок 9. 3).

9. 1. 3. Климатические аномалии после стратосферного извержения вулкана Паркер 1640 г. н. э.

В 1640 г. произошло мощное вулканическое извержение вулкана Паркер (Таблица 9.1). В Сибирских хронологиях данное событие нашло отклик только в 1642 г. (Рисунок 9. 3).

9. 1. 4. Климатические аномалии после стратосферного извержения вулкана Тамбора 1815 г. н. э.

Извержению вулкана Тамбора (год без лета), посвящено большое число научных работ, и проведение многочисленных конференций, в числе последней, проведенной в 2015 году в г. Берне, Швейцария [Сидорова и др., 2005 б; Brönnimann et al., 2016]. Из схематического рисунка 9. 6. видно, что практически 1 год занимает распределение SO₂ и аэрозолей после вулканического извержения Тамбора.



Рисунок 9. 6. Схематический рисунок, показывающий распределение SO₂ и аэрозолей после вулканического извержения Тамбора [Brönnimann et al., 2016].

По историческим данным вулкан Тамбора стал причиной низкого урожая, эпидемий, повлекшим к гибели более чем 200000 человек по всему миру [Brönnimann et al., 2016]. По данным моделей атмосферной циркуляции было выявлено, что уменьшение осадков наблюдалось в 1816 г. н. э. в Африке, восточной Азии, и северной Америки. Засушливые условия наблюдались в центральной и западной частях Азии. Холодное и дождливое лето реконструировано для западной части Европы. Исследование, изложенное в данной диссертации, позволяет получить информацию о Сибирских регионах, которые до сих пор отсутствовали в международной базе данных.

Так, извержение Тамбора было зафиксировано клеточными хронологиями для YAK в 1816 г. н.э., как экстремальный год. Хронология, полученная по δ¹³С в целлюлозе деревьев ALT указывает на экстремальные события только в 1817 г. н. э. (Рисунок 9. 3).

9. 1. 5. Климатические аномалии после стратосферного извержения вулкана Пинатубо 1991 г. н. э.

Стратосферное извержение вулкана Пинатубо (1991 г. н.э.) является хорошо изученным и достаточно хорошо описанным в литературе. Данное извержение повлекло к снижению солнечной активности до 10%, что привело к снижению среднегодовой температуры воздуха по всему земному шару на 0,5 – 0,6 С. Одновременно с понижением температуры воздуха, произошло нагревание стратосферных слоев атмосферы на несколько градусов выше, относительно средних значений, вследствие абсорбции радиации аэрозолями. Стратосферные вулканические облака сохранялись в атмосфере в течение трех лет после извержения. Несмотря, на глобальный эффект извержение Пинатубо не оказало значительного влияния на рост деревьев, произрастающих в высокоширотных и высокогорных районах Евразии. Рассмотрим влияние выше описанных извержений, зафиксированных параметрами годичных колец лиственниц из трех Сибирских районов более подробно.

Рассчитанная функция плотности для каждого параметра годичного кольца для 536 – 538 гг. н. э., 541 - 542 гг. н. э., 1258 – 1259 гг. н. э., 1641 – 1642 гг. н. э., 1816 - 1817 гг. н. э., 1992 - 1993 гг. н. э. была рассчитана для YAK, TAY и ALT (Рисунок 9. 7, левая, средняя и правая панели), соответственно, показали, что вулканические годы ведут к очень экстремальным, экстремальным аномалиям.

Экстремальные 536 г. и 541 г. н. э., характеризуются аномальными изменениями CWT и δ^{13} C для всех исследуемых районов. Экстремальные изменения были зафиксированы для δ^{18} O хронологии, построенной для ALT. 1258 г., характеризуется как очень экстремальный для CWT, TRW для всех районов исследования, в то время как аномалии 1259 г. зафиксированы в TRW, MXD и δ^{13} C. 1642 г. н. э. классифицировался как очень экстремальный для VAK и TAY, в то время как для ALT аномалии зафиксированы в δ^{13} C и δ^{18} O. 1992 г. н.э. являлся аномальным для MXD, CWT, для YAK. Для 1993 г. н. э. аномалии зафиксированы для CWT и δ^{18} O хронологий для ALT (Рисунок 9. 7, правая панель).




Рисунок 9. 7. Функция плотности для каждого параметра годичного кольца для 536 г., 537 г., 538 г., 541 г., 542 г., 1258 г., 1259 г., 1641 г., 1642 г., 1816 г., 1817 г., 1992 г., и 1993 г., была рассчитана для YAK (левая), TAY (средняя) и ALT (правая) панели.

9.2. Климатические функции отклика между метеорологическими данными и параметрами годичного кольца

Методом вероятностных распределений, основанных на многократной генерации выборок методом Монте-Карло на базе имеющейся выборки были рассчитаны коэффициенты корреляции между климатическими данными, полученными с ближайших метеорологических станций (Глава 2, Таблица 2. 1). Значимые коэффициенты корреляции представлены на Рисунке 9. 8.



Рисунок 9. 8. Статистически значимые коэффициенты корреляции между параметрами годичных колец и метеорологическими данными: температура (красный), осадки (синий), дефицит упругости водяного пара (зеленый), и продолжительность солнечного сияния (желтый), рассчитанные с сентября предыдущего года (s) по август (A) текущего года.

9. 2. 1. Влияние температуры воздуха на рост хвойных после стратосферных извержений вулканов

Корреляционный анализ позволил выявить значимые статистические связи между TRW (r = 0,52; p < 0,05), MXD (r = 0,57; p < 0,05); δ^{13} C (r = 0,38; p < 0,05), CWT (r = 0,28; p < 0,05) для ALT с температурой воздуха июня (Рисунок 9. 8). В то время как температура июля значимо отражается для всех параметров годичного кольца и для всех районов исследования с диапазоном от r = 0,28 до r = 0,60; p < 0,05 за исключением δ^{18} O хронологии по TAY. В то же время температура августа оказывает влияние на MXD и CWT для YAK (r=0,34; r=0,40; p < 0,05, соответственно); δ^{18} O (r=0,48; p < 0.05), δ^{13} C (r=0,33; p < 0,05) и CWT (r=0,28; p < 0,05) для ALT. Наряду с общим для всех параметров положительным влиянием летних температур, была выявлена статистически значимая связь между температурой воздуха февраля и δ^{18} O целлюлозы для YAK и ALT (r=0,25; r=0,26; p < 0,05, соответственно). Для δ^{18} O хронологии для TAY выявлены значимые связи с температурой воздуха весенних месяцев марта и мая (r=0,30; r=0,35; p < 0.05), соответственно.

Летние температурные аномалии в течение 536, 541, 542, 1258, 1259 гг. н.э. выявлены по данным TRW, MXD и CWT для всех районов исследования (Рисунок 9. 9). После XII века снижение температуры после мощных стратосферных вулканических извержений не показывают явно выраженного снижения температуры для всех параметров годичных колец. Например, снижение летней температуры воздуха в 1641 г. н.э. были зафиксированы CWT для ALT, в 1642 г. н.э. – для TRW хронологии из YAK, однако 1643 год был зафиксирован как экстремально холодный для TAY, базируясь на данных для TRW и CWT; 1816 г. н.э. был холодным для YAK по данным хронологии, полученной по CWT. Холодный 1992 год после извержения вулкана Пинатубо был зафиксирован в хронологиях по MXD и CWT для YAK; 1993 год был аномально холодным для ALT, по данным CWT и δ¹⁸O (Рисунок 9. 9).

Сопоставление параметров годичного кольца из высокоширотных и высокогорных районов исследования указывают на различные климатические сигналы, зафиксированные деревьями лиственниц после мощных стратосферных извержений. Длительное влияние холодных летних температур оказало влияние на снижение фотосинтетической активности

и послужило формированию узких годичных колец в период с 516-560 гг. и 1242-1286 гг. н.э.

Исключительной особенностью данного периода за последние 1500 лет является формирование очень малого числа клеток, так в случае для образцов ҮАК было найдено всего 2 клетки, относительно средних значений по кольцу в диапазоне 12-17 для высокоширотных районов, и до 30 клеток для высокогорного ALT.

Значительное уменьшение значений δ^{18} О в 536 г. (-4,8 σ) относительно периода с 516 по 560 гг. н. э. для ALT может быть объяснено экстремально холодными температурами и формированием морозобойных колец [Мыглан и др., 2009; Churakova (Sidorova) et al., 2014]. Извержение вулкана Паркер в 1641 г. н.э. отразилось в Сибирских хронологиях на два года позже. Современное извержение вулкана Пинатубо в год извержения не отразилось на анализируемых хронологиях, и только на следующий 1992 год было зафиксировано данное событие в YAK и в 1993 году на ALT. Такого рода позитивные аномалии могут быть объяснены разницей распределения пылевой завесы после извержения (Рисунок 9. 6) и нарушением атмосферных циркуляционных масс, приводящих к повышенной облачности.

Зимнее и весенние аномальные потепления после извержения вулкана Пинатубо, сообщающиеся в работе Робока и Мао [Robock, Mao, 1992] согласуется с данным исследованием для δ^{18} О хронологий, полученных для ТАҮ и ALT. Однако, не было найдено длительного эффекта похолодания или аномальных изменений клеточной стенки как это было найдено для 536 и 541 гг. н.э. [Churakova (Sidorova) et al., 2014].

Значимые статистические связи выявлены между атмосферными осадками июля и δ^{18} О в целлюлозе (r=-0,34; *p*<0,01) для YAK, а также с δ^{13} С хронологиями для TAY (r=-0,51; *p*<0,05) и ALT (r=-0,54; *p*<0,01). Отрицптельно значимая связь была выявлена между δ^{18} O в целлюлозе годичных колец лиственницы для ALT и атмосферными осадками августа (r=-0,29; *p*<0,01). Осадки марта положительно коррелировали с TRW (r=0,37; *p*<0,01), MXD (r=0,32; *p*<0,01) и CWT (r=0,34; *p*<0,01), соответственно. Клеточные хронологии (CWT) значимо коррелировали с температурой и осадками для ALT (Рисунок 9. 8, 9. 9). Аномально сухим был 536 г. для YAK и TAY, в то время как 541 и 542 гг. н.э. для TAY и ALT. Сухим был 1258 г. н. э. на ALT, в то время как 1259 год характеризовался сухими условиями для всех районов исследования. 1641 г. был сухим для TAY; 1642 для YAK и ALT. Более влажными были 1815 и 1816 годы на TAY. 1991 был влажным для YAK, 1992 для ALT с последующим сухим летом в 1993 г. н. э. (Рисунок 9. 9).

Значимое влияние среднемесячных изменений дефицита упругости водяного пара в июне, июле и августе было выявлено по содержанию изотопов кислорода в целлюлозе годичных колец для ALT (r=0,67; r=0,55; r=0,46, p<0,01), соответственно для периода 1950-2000 гг. н.э. В то время как δ^{13} С и δ^{18} О в целлюлозе годичных колец YAK значимо коррелирует с VPD июля (r = 0,69; 0,31; p < 0,05), соответственно.

Наличие воды является важным для лиственниц, произрастающих в экстремально холодных климатических условиях в зоне многолетней мерзлоты, которая может быть рассмотрена резервуаром для дополнительного источника воды в течение засушливых периодов [Sugimoto et al., 2002; Boike et al., 2013; Saurer et al., 2016]. Однако, это не всегда возможно для деревьев, произрастающих на северо-востоке Якутии (YAK) [Churakova (Sidorova) et al., 2016], вследствие того, что талая вода не всегда может быть использована корнями деревьев из-за физиологической структуры корневой системы (поверхностные корни) или вследствие холодной воды, которая не может быть использована деревьями [Churakova (Sidorova) et al., 2016а].

9. 2. 3. Влияние продолжительности солнечного сияния на рост деревьев после стратосферных извержений вулканов

Инструментальные измерения длительности солнечного сияния в июле для современного периода для двух районов исследования (YAK и ALT) показывает значимую связь с δ^{18} О целлюлозы, которая может быть проинтерпретирована как косвенный источник связи между температурой и солнечной активностью. Основываясь на данных δ^{18} О целлюлозы солнечные периоды значительно уменьшилась в 536 г., 541 г., 542 г., 1258 г. и 1259 г. н. э. для YAK, и для ALT. Однако, лето 1991-го года, известное извержением вулкана Пинатубо на YAK было солнечным (Рисунок 9. 9), не оказав влияния после извержения в тот же самый год. В то время как, последующие годы характеризовались пониженной солнечной активностью, однако не сопоставимой с извержениями 535 и 540 гг. н.э.

Вулканическая пыль после извержения снижает интенсивность света, что влечет за собой уменьшение фотосинтетической активности, и как следствие, частичное снижение устьичной проводимости, что непосредственно отражается на значениях стабильных изотопов.



Рисунок 9. 9. Отклик деревьев из высокоширотных (YAK, TAY) и высокогорного ALT районов на известные и неизвестные извержения вулканов с распределениями, рассматриваемыми как очень экстремальные (< 5, насыщенный цвет), экстремальные (>5, <10, светлый цвет) и не экстремальные (>10, белый цвет). Снижение продолжительности

солнечного сияния отмечено черным треугольником, в то время как повышение – серым. Снижение дефицита упругости водяного пара выделено фиолетовым кругом, светло фиолетовым отмечено его повышение. Снижение температуры воздуха выделено синим квадратом, потепление или незначительное снижение температуры воздуха – светло синим квадратом. Увеличение осадков выделено светло-голубым ромбом.

9. 3. Климатические аномалии, зафиксированные после стратосферных извержений вулканов по данным годичных колец, ледниковых кернов и споро-пыльцевых спектров

9. 3. 1. Температурные аномалии

Реконструкции летней температуры воздуха, полученные для Якутии (YAK) и Алтая (ALT) и реконструкции арктических колебаний для Таймыра (TAY) по данным содержания кислорода в целлюлозе годичных колец были сопоставлены с содержанием δ^{18} O в ледниковых кернах Гренландии [Meese et al., 1994], Северная Земля [Opel et al., 2013] и Белуха [Eichler et al., 2009], а также с реконструкциями среднегодовых температур оз. Телецкое [Kalugin et al., 2000] и споро-пыльцевыми спектрами оз. Лама [Andreev et al., 2000] для отдельных периодов исследования.

a)







Рисунок 9. 10. Реконструкции по температуре воздуха июля для YAK и ALT, арктических колебаний мая для TAY и содержанием δ¹⁸O в ледниковых кернах Гренландии [Meese et al., 1994], Северная Земля [Opel et al., 2013] и Белуха [Eichler et al., 2009] для периодов: (a) 516-560 гг., (б) 1242-1286 гг., (в) 1625-1659 гг., (г) 1790-1834 гг., (д) 1970-1996 гг., с центрированными датами мощных вулканических извержений в 536 гг., 1257 гг., 1641 гг., 1815 гг., 1991 гг. Хронологии сглажены 11-летним окном Хэмминга.

Из рисунка 9. 10 можно отметить, что согласованность между реконструкциями по среднегодовой температуре, полученной по данным озерных отложений и реконструкции июльской температуры воздуха, полученной по данным годичных колец свидетельствуют о понижении значений температуры в отдельные годы после стратосферных вулканических

извержений 536 г., 1258 г., 1642 г., 1815 г. и 1992 г. н. э. Реконструкция температуры марта – ноября, полученная по содержанию δ^{18} О в ледниковом керне Белуха показывает согласованное понижение температуры после извержения вулкана Самалос (1257) [Guillie, 1257] в 1258 г., а также понижение температуры в 1642 г., 1816 г., после извержений Паркер и Тамбора. Однако, извержение вулкана Тамбора не выражалось в значительном снижении данных по содержанию кислорода. Интересен тот факт, что наиболее выраженным событием был холодный 1812 год.

Реконструкция среднегодовой температуры оз. Телецкое (Алтай) [Калугин и др., 2000] (Рисунок 9. 11) в сопоставление с реконструированной температурой воздуха для мартаноября по данным ледникового керна Белуха [Eichler et al., 2009] и данным по δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец деревьев для ALT указывает так же на снижение среднегодовой и июльской температуры воздуха для VI, XIII, XVIII вв. Все палеоклиматические источники указывают на значительные теримические изменения в течение современного периода. Однако, между хрнонологиями так же отмечается разница в реконструированных данных по температуре, что обусловлено разной сезонностью.



Рисунок 9. 11. Реконструкции среднегодовой температуры воздуха оз. Телецкое (красная линия) [Калугин и др., 2009], средней температуры воздуха марта-ноября ледникоаого керна Белуха [Eichler et al., 2009] (голубая линия) и температуры воздуха июля, полученной по данным δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец деревьев (синяя линия).



Рисунок 9. 12. Реконструкция температуры воздуха июля, полученная по данным δ¹³С в целлюлозе годичных колец северо-востока Якутии (YAK) и δ¹⁸О хронология, полученная по данным ледникового керна Гренландии (GISP2).

Понижение температурных значений для 536 г., 1257 г., и 1259 г. зафиксировано синхронно двумя косвенными источниками информации. Однако, событие 1641 г. и 1815 г. н. э. зафиксировано только в ледниковом керне Гренландии (Рисунок 9. 12). При имеющейся синхронности температурных кривых в годы вулканической активности существуют так же различия в отклике на климатические изменения после извержений. В частности, событие 1815 года не отразилось на росте деревьев, однако снижение температуры зафиксировано в озерных отложениях оз. Телецкое и в ледниковом керне Белуха. Данная рассогласованность между палеоклиматическими архивами, может быть вызвана тем, что датировка слоев донных отложений и привязка к календарным датам была осуществлена с использованием информации о температурной изменчивости, извлеченной из ледниковых кернов Гренландии. Такая же календарная привязка была осуществлена для ледниковых керна Белуха. Следовательно, погрешности в калибровке, присутствующие в ледниковых кернах Гренландии, которые периодически уточняются [Sigl et al., 2013, 2015] с привлечением других косвенных источников информации отражаются, так же в донных отложениях оз. Телецкое и ледниковом керне Белуха.

9. 3. 2. Аномалии в гидрологическом режиме

Сопоставление реконструкций, полученных по среднегодовым осадкам оз. Телецкое и осадкам июля, полученным по данным δ^{13} С в целлюлозе лиственниц, произрастающих на Монгун тайга, Алтай (Глава 5) было выявлено, что вулканические извержения 535 г. и 1257 г. н.э., были влажными по данным двух косвенных источников, однако, после этих событий последовало аномальное уменьшение осадков для 537-541 гг., 1258 гг., 1642 гг. н. э. (Рисунок 9. 13). Извержение вулкана Тамбора (1815 г. н. э.) по реконструкциям осадков вызвало наступление более влажных периодов 1817-1820-х гг. Реконструкции по осадкам двух палеоклиматических архивов показывают общую направленность и общее снижение осадков после 1860-х годов.



Рисунок 9. 13. Реконструкции среднегодовых осадков оз. Телецкое (черная линия) и осадков июля, полученной по данным δ¹³С в целлюлозе годичных колец деревьев (синяя линия).

9. 3. 3. Смещение фаз атмосферных циркуляционных масс

Реконструкция арктических колебаний мая, полученная по данным δ^{18} О в целлюлозе годичных колец лиственниц из восточной части Таймырского полуострова в сопоставлении с δ^{18} О хронологией, полученной из ледникового керна Северная Земля (Рисунок 9. 14) отражает положительные арктические колебания после вулканических извержений таких как Самалос (1257 г. н. э.), Паркер (1641 г. н. э.) и Пинатубо (1991 г. н. э.), свидетельствуя о засушливых условиях в данные годы на исследуемой территории. Однако, извержение вулкана Тамбора (1815 г. н.э.) привело к засушливым условиям, вызванным арктическими колебаниями в течение последующих двух лет в высокопиротных районах (YAK, TAY). Однако, в высокогорном Алтае 1817 г. характеризовался увеличением влажных условий. Температура воздуха июля по данным споро-пыльцевых спектров согласуется с данными по содержанию δ^{18} О в ледниковом керне Северная Земля. Выявлена общая тенденция используемых для сопоставления палеоклиматических архивов увеличения температуры и уменьшения осадков в течение XX века.

Однако, неоднородность климатического сигнала, продемонстрированная в данной работе, подтверждается и другими региональными исследованиями, показывающие неоднородность климатического сигнала на вулканические извержения [Esper et al., 2017]. Исследования Еспера и др. [Esper et al., 2017] особо обратили внимание на разнородность сигнала между разными климатическими источниками, которые могут быть объяснены региональными особенностями и природными климатическими вариациями, не связанными с датировкой палеоклиматических источников. Однако, несомненно важно расширить пространственно-временную сеть с включением других параметров, такие как стабильные изотопы, которые позволяют выявить информацию об изменении не только температуры, но и осадков, дефицита упругости водяного пара, продолжительности солнечного сияния и арктических коллебаний.



Рисунок 9. 14. Реконструкция арктических колебаний мая, полученная по данным δ^{18} О в целлюлозе годичных колец лиственницы из восточной части Таймырского полуострова (линия черного цвета), в сопоставлении с δ^{18} О хронологией, полученной из ледникового керна Северная Земля, пик Академии Наук (линия фиолетового цвета). Красной линией обозначена реконструкция температуры воздуха июля, полученная по данным споропыльцевых спектров оз. Таймыр [Andreev et al., 2004].

- Основываясь на анализе ширины, максимальной плотности поздней древесины, толщины клеточной стенки, δ¹³С и δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец была выявлена синхронность холодных и влажных летних аномалий с низким приходом солнечной радиации в течение 536-538 гг. н. э., 541-542 гг. н. э., 1258-1259 гг. н. э., для высокоширотных районов исследования.
- Значимыми факторами, оказывающими влияние на отклик деревьев на мощные стратосферные вулканические извержения, могут быть местоположения вулканов, индекс вулканической активности, перенос атмосферных циркуляционных масс.
- 3. Выявлено, что не все глобальные вулканические извержения приводят к интенсивному похолоданию и уменьшению осадков в высокоширотных и высокогорных районах Евразии, экосистем, наиболее чувствительных к изменениям климата как в региональном, так и глобальном масштабах.
- Многопараметрический подход, используемый в данной работе позволил выявить информацию об изменении осадков, облачности и дефицита упругости водяного пара в атмосфере, факторах, которые невозможно было бы выявить, используя только данные по ширине годичного кольца.
- 5. Использование других палеоклиматических данных, содержащихся в ледниковых кернах, озерных отложениях и споро-пыльцевых спектрах, в сопоставление с данными параметров структуры годичного кольца и содержания стабильных изотопов углерода и кислорода представляет собой уникальную возможность выявить динамику изменения температуры и атмосферных осадков после стратосферных вулканических извержений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранние исследования, проведенные по данным ширины годичных колец деревьев лиственниц из субарктических районов Евразии, предполагали, что только летняя температура воздуха является важным фактором, оказывающим влияние на рост деревьев, произрастающих в зоне многолетней мерзлоты.

Впервые, результаты данной работы позволили провести расширенное описание изменений климата и условий окружающей среды (влияние количества атмосферных осадков, облачности), индекса арктических колебаний, эффективности использования воды деревьями по данным тысячелетних хронологий углерода (δ^{13} C) и кислорода (δ^{18} O) в целлюлозе годичных колец хвойных для высокоширотных и высокогорных районов Евразии.

Применение экофизиологических и процессных моделей для интерпретации климатического сигнала, содержащегося в δ^{13} С и δ^{18} О хронологиях, для северо-востока Якутии деревьев позволили выявить взаимосвязь между ростом лиственниц, произрастающих на мерзлоте и количеством осадков, а так же изменением активного слоя почвы из-за деградации мерзлоты под воздействием изменения температуры и концентрации СО₂ в атмосфере в течение современного периода. Дальнейшее применение и рассмотрение параметров годичных колец деревьев, таких как ширина годичных колец, максимальная плотность поздней древесины, анатомические параметры структуры годичных колец и стабильных изотопов в экофизиологических моделях, помогут выявить взаимодействие между деградацией вечной мерзлоты и продуктивностью лесных экосистем в течение современного потепления. Применение глобальных климатических моделей для лесных экосистем в течение прошлых и современных периодов поможет более реалистично оценить величину современного потепления, а также помочь предсказать возможные дальнейшие изменения климата не только регионального, но и глобального масштабов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Впервые для северо-востока Якутии, востока Таймыра и высокогорного Алтая получены длительные хронологии по содержанию стабильных изотопов углерода (δ¹³C) и кислорода (δ¹⁸O) в целлюлозе годичных колец лиственниц.
- 2. Выявлено влияние летних осадков и дефицита упругости водяного пара (VPD) на рост деревьев лиственниц из высокоширотных и высокогорных районов Евразии по содержанию δ¹³C в целлюлозе годичных колец. Изменения температуры воздуха и суммарной продолжительности солнечного сияния зафиксированы в содержании δ¹⁸O в целлюлозе годичных колец деревьев лиственниц, произрастающих на северовостоке Якутии и Алтае, которые согласуются с другими косвенными источниками информации, такими как ледниковые керны. Влияние арктических колебаний, определяющие перенос осадков, зафиксировано в δ¹⁸O целлюлозе годичных колец деревьев лиственниц.
- 3. Реконструкция температуры воздуха и VPD в июле, полученные по данным δ¹³C в целлюлозе годичных колец лиственниц, произрастающих на северо-востоке Якутии, позволили выявить увеличение температуры ≈ 1,7 °C, и увеличение VPD ≈ 0,7 мбар по сравнению с прошлым тысячелетием. Данные реконструкции свидетельствуют, что климат в исследованных районах становится теплее и суше. Реконструкция суммарных часов продолжительности солнечного сияния для июля месяца, полученная по данным δ¹⁸O, свидетельствует о меньшем количестве солнечных часов в течение 1950-2004 гг. по сравнению с прошлыми десятилетиями.
- 4. Выявлено снижение осадков июля для современного периода (1950 2009 гг. н.э.) по сравнению с прошлым тысячелетием для востока Таймыра. Основываясь на реконструированных данных индекса арктических колебаний мая, полученными по содержанию стабильных изотопов кислорода в целлюлозе годичных колец деревьев лиственниц, показано, что IX-X века на востоке Таймыра характеризовались более сухими условиями весен по сравнению с современным периодом.

- 5. Установлено, что период средневекового потепления неоднородно регистрируется в древесных кольцах деревьев, произрастающих на востоке Таймыра и северо-востоке Якутии. Современное потепление (1950-2004 гг. н.э.) характеризуется засушливыми условиями для двух регионов исследования. Установлено, что потепление ХХ века не является аномальным на севере Сибири, ни относительно абсолютной температуры, ни темпов ее изменения. Подобные современным, климатические условия до настоящего времени уже были зарегистрированы около 6000 лет назад на востоке Таймыра, согласно реконструкциям на основе годичных колец, споро-пыльцевых спектров и ледниковых кернов. Сравнительный анализ изотопных хронологий для Швеции, Финляндии, Норвегии, а также северо-западных районов России показал, что средневековой период был теплым, влажным и облачным, а для северо-восточной части теплым, сухим и солнечным. Малый ледниковый период был влажным и облачным в восточной части субарктики Евразии (северо-восток Якутии), по сравнению с северно-западной частью Европы.
- 6. Реконструкция атмосферных осадков июля для горного Алтая свидетельствует о засушливых периодах в течение IX-XI, XIII, XIV, XVIII-XXI веков. Влажные периоды выявлены в течение VII, XII, XV, XVII веков. По данным δ¹⁸О получены реконструкции по VPD в июне, температуре воздуха и продолжительности солнечного сияния в июле. Анализ стабильных изотопов позволил выявить, что аномально холодные годы VI века характеризовались засушливыми условиями и увеличением облачности. Однако, период современного потепления характеризуется как более засушливый и солнечный, подобно периоду средневекового потепления.
- 7. Применение экофизиологических моделей в сочетании с прямыми измерениями δ¹³C и δ¹⁸O в древесине и целлюлозе помогает разделить влияние таких гидроклиматических факторов как использование атмосферных осадков или почвенной влаги из более глубоких слоев при оттаивании сезонных многолетне-мерзлотных почв. Показано, что у деревьев, произрастающих в высокоширотных районах Евразии, эффективность использования воды (iWUE) выше для северо-восточных районов

субарктики по сравнению с северо-западными. Обнаружено, что iWUE, рассчитанная для деревьев, произрастающих вдоль Сибирского трансекта увеличивается с севера на юг. Выявлено, что увеличение iWUE пропорционально увеличению атмосферного CO₂ и устьичной проводимости. Расчеты по модели LPX - Вегп свидетельствуют, что физиология устьиц адаптировалась к меняющимся условиям окружающей среды вследствие накопления углерода путем ассимиляции и потери воды за счет транспирации.

- 8. Анализ ширины годичного кольца, максимальной плотности поздней древесины, толщины клеточной стенки, δ^{13} С и δ^{18} О в целлюлозе годичных колец деревьев позволил выявить синхронность холодных и сухих летних аномалий с уменьшением суммарной продолжительности солнечного сияния в течение 1258 г. и 1259 г. н. э., для высокогорных районов исследования. высокоширотных И Однако, после стратосферных извержений вулканов 535 и 540 гг. н.э. отмечалось увеличение влажности для высокоширотных районов. Стратосферные вулканические извержения последних пяти столетий не оказали существенного влияния на лесные экосистемы из высокоширотных и высокогорных районов Евразии. Выявлено, что не все стратосферные вулканические извержения приводят к интенсивному похолоданию и уменьшению осадков в субарктических районах Сибири, экосистемы которых наиболее чувствительных к изменениям климата как в региональном, так и глобальном масштабах.
- 9. Комбинация классических методов дендрохронологии с анализом стабильных изотопов углерода и кислорода, а также с использованием других косвенных источников принципиально расширяет возможности палеоклиматического анализа, параметризации и верификации экофизиологических и процессных моделей и позволяет выявить и оценить влияние сезонной динамики оттаивания многолетней мерзлоты и атмосферных осадков на рост древесных растений из высокоширотных и высокогорных районов Евразии.

Литература

- 1. Абаимов, А. П., Бондарев, А. И., Зырянова, О. А., Шитова, С. А. Леса Красноярского Заполярья. Новосибирск / А. П. Абаимов // «Наука». 1997. 207 с.
- 2.Апасова, Е. Г., Клещенко, Л. К. Описание массива данных суммарной за месяц продолжительности солнечного сияния на станциях России / Е. Г. Апасова // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621446. 2011.
- 3.Ары Мас. Природные условия, флора и растительность. Ленинград / Б. Н. Норин // «Наука», 1978. 184 с.
- 4.Бабич, В. В., Дарьин, А. В., Калугин, И. А., Смолянинова, Л. Г. Использование периодических природных процессов для прогноза климата внетропических широт Северного Полушария на ближайшие 500 лет / В. В. Бабич // Метеорология и гидрология, 2016. – № 9. – С. 5-14.
- 5. Бенькова, А. В., Шашкин, А. В. Фотосинтез сосны и лиственницы и его связь с радиальным приростом /А. В. Бенькова // Лесоведение. 2003. № 5. С. 38-43.
- 6.Ваганов, Е. А., Шиятов, С. Г. Роль дендроклиматических и дендрогидрологических исследований в разработке глобальных и региональных экологических проблем (на примере азиатской части России) / Е. А. Ваганов // Сибирский экологический журнал. 1999. Том VI. № 2. С. 111-115.
- 7.Ваганов, Е. А., Шиятов, С. Г., Мазепа, В. С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е. А. Ваганов // Новосибирск, Наука, Сиб. изд. РАН. – 1996. – 324 с.
- 8.Дженкинс, Г., Ваттс, Д. Спектральный анализ и его приложения. / Г. Дженкинс // Издво. Мир, 1971. Т. 1. 312 с.
- 9.Калугин, И. А., Дарьин, А. В., Бабич, В. В. 3-000 летняя реконструкция среднегодовых температур Алтайского региона по литолого-геохимическим индикаторам донных осадков оз. Телецкое / И. А. Калугин // Доклады Академии Наук, 2009. – № 426 (4). – С. 520-522.

- Кирдянов, А. В., Кнорре, А. А., Прокушкин, А. С. Многолетняя мерзлота как фактор, определяющий продуктивность северных лесов / А. В. Кирдянов // Лесное хозяйство, 2008. – № 3. – С. 13-14.
- Мазепа В. С. Пространственно-временная изменчивость радиального прироста хвойных видов деревьев в субарктических районах Евразии / В. С. Мазепа // Автореф. дис. док. биол. Наук. Екатеринбург, 1998. – 24 с.
- 12. Методы дендрохронологии. Часть 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Методическое пособие, под ред. Шиятова, С. Г., Ваганова, Е. А. // Изд-во КрасГУ, Красноярск, 2000. – 80 с.
- Мыглан, В. С., Ойдупа, О. Ч., Ваганов, Е. А. 2367 летняя древесно-кольцевая хронология для Алтае-Саянского региона. (Горный массив Монгун тайга) / В. С. Мыглан // Археология, этнография и антропология Евразии. № 40 (3). С. 76 83.
- 14. Мыглан, В. С., Овчинников, Д. В., Ваганов, Е. А., Быков, Н. И., Герасимова, О. В., Сидорова, О. В., Силкин, П. П. Построение 1772-летней древесно-кольцевой хронологии для Республики Алтай / В. С. Мыглан // Известия Российской Академии Наук. – 2009. – № – 6. – С. 70-77.
- 15. Наурзбаев, М. М., Ваганов, Е. А., Сидорова, О. В. Изменчивость приземной температуры воздуха по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий Евразии / М. М. Наурзбаев // Криосфера Евразии. 2003. Том. VII. № 2. С. 84-91.
- 16. Наурзбаев, М. М., Сидорова, О. В. Изменчивость циркумполярного сектора Евразии по тысячелетним древесно-кольцевых хронологий / М. М. Наурзбаев // Биосферный парк "Таймырский", Исследование природы Таймыра "История, климат, почвы, флора и вегетация, животный мир". Красноярск. – 2002. – С. 169-176.
- 17. Наурзбаев, М. М., Сидорова, О. В., Ваганов, Е. А. История климата позднего голоцена на востоке Таймыра по данным сверх длительной хронологии / М. М. Наурзбаев // Жур. Археология этнография и антропология Евразии. 2001. Вып. 3. № 7. –. С. 17-25.
- 18. Николаев, А. Н., Кирдянов, А. В., Шлезер, Г. Х., Хелле, Г. Вариации параметров годичных колец и содержание стабильных изотопов δ¹³С у лиственницы Каяндера в восточной Якутии / А. Н. Николаев // Лесоведение. 2006. № 2. С. 51-70.

- Сидорова, О. В., Наурзбаев, М. М. Реакция на климатические изменения лиственницы Каяндера на верхней границе леса и в долине реки Индигирки /О. В. Сидорова // Жур. Лесоведение. – 2002. – № 2. – С. 73-75.
- 20. Сидорова, О. В. Длительные изменения климата и радиальный рост лиственницы на севере Средней Сибири и северо-востоке Якутии в позднем Голоцене: автореф. дис...канд. Биол. наук: 03.00.16 / Сидорова Ольга Владимировна. – 2003. – 24 с.
- 21. Сидорова, О. В., Наурзбаев, М. М. Длительные изменения температуры в Сибири в контексте современных глобальных изменений / О. В. Сидорова // Сибирский экологический журнал. 2005. № 1. С. 51-60.
- 22. Сидорова, О. В., Наурзбаев, М. М., Ваганов, Е. А. Чемпионы долгожители среди древесных видов / О. В. Сидорова // Лесоведение, 2005 а. № 5. С. 3-11.
- 23. Сидорова, О. В., Наурзбаев, М. М., Ваганов, Е. А. Отклик древесно-кольцевых хронологий севера Евразии на мощные вулканические извержения /О. В. Сидорова // В кн: Проблемы экологического мониторинга и экологического моделирования. Ред. Семенов, М., Москва. 2005 б. ХХ. С. 60-72.
- 24. Сидорова, О. В., Ваганов, Е. А., Наурзбаев, М. М. Климатическая динамика позднего Голоцена для северной Евразии по данным ледовых кернов Гренландии и тысячелетних древесно-кольцевых хронологий / О. В. Сидорова // Известия Российской Академии Наук. – 2007. – № 1. – С. 95-107.
- 25. Сидорова, О. В., Ваганов, Е. А., Сингвольф, Р., Саурер, М., Шашкин, А. В. Современные изменения климата на северо-востоке республики Саха (Якутия) выявленные по данным стабильных изотопов (¹³C/¹²C, ¹⁸O/¹⁶O) в годичных кольцах / О. В. Сидорова // Лесоведение. 2010. № 4. С. 3-8.
- 26. Сидорова, О. В., Наурзбаев, М. М. Реакция на климатические изменения лиственницы Каяндера на верхней границе леса и в долине реки Индигирки / О. В. Сидорова // Лесоведение. 2002. № 2. С. 73-75.
- 27. Украинцева, В. В. Новые палеоботанические и палинологические свидетельства раннеголоценового потепления климата в высоких широтах Арктики / В. В. Украинцева // Ботан. Журн. 1990. Т. 75. № 1. С. 70-73.

- 28. Фильрозе, Е. М., Гладушко, Г. М. Способ проявления границ и структуры годичных колец // Дендрохронология и дендроклиматология / Е. М. Фильрозе // Новосибирск. – "Наука". – 1986. – С. 68-71.
- 29. Шиятов, С. Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале / С. Г. Шиятов // М. Наука, 1986. 136 с.
- 30. Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg E. T. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests / C. D. Allen // Forest Ecology and Management. 2010. № 259. P. 660-684.
- 31. ACIA. Impacts of a warming Arctic Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press // Cambridge. – 2004. – 144 p.
- 32. Andreev, A. A., Tarasov, P. E., Klimanov, V. A., Melles, M., Lisitsyna, O. M., Hubberten, H. W. Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene / A. A. Andreev // Quaternary International. 2004. № 122. P. 69-84.
- 33. Andreev, A. A., Siegert, C., Klimanov, V. A., Derevyagin, A. U., Shilova, G. N., Melles, M. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the Taymyr lowland, northern Siberia / A. A. Andreev // Quaternary research. 2002. № 1. Vol. 57. P. 138-150.
- 34. Arneth, A., Lloyd, J., and Santruckova, H. Response of central Siberian Scots pine to soil water deficit and long-term trends in atmospheric CO₂ concentration /A. Arneth // Global Biogeochemical cycles. – 2002. – № 16. – DOI. 10.1029/2000GB001374.
- 35. Apps, M. J., Shvidenko A. Z., Vaganov E. A. Boreal Forests and the Environment: A Foreword, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change / M. Apps, D. Price, J. Wisniewski (Eds) // ISBN 978-94-017-0942-2. BFE. 2006. № 11(1). P. 1 4.
- 36. Baillie, M. G. L. Dendrochronology raises questions about the nature of the A.D. 536 /M. G.
 L. Baillie // The Holocene. 1994. № 4. P. 212.
- 37. Bale, R. J., Robertson, I., Salzer, M. W., Loader, N. J., Leavitt, S. W., Gagen, M., Harlan, T. P., McCarroll, D. An annually resolved bristlecone pine carbon isotope chronology for the last millennium /R. J. Bale // Quaternary Research. 2011. № 76. doi:10.1016/j.yqres.2011.05.004.

- 38. Ballantyne, A. P., Baker, P. A., Chambers, J. Q., Villalba, R., and Argollo, J. Regional Differences in South American Monsoon Precipitation Inferred from the Growth and Isotopic Composition of Tropical Trees /A. P. Ballantyne // Ecosystem and Conservation Sciences Faculty Publications. – № 4. – 2011.
- 39. Barber, V. A., Juday, G. P., Bruce, P., and Wilmking, M. Reconstruction of Summer Temperatures in Interior Alaska from Tree-Ring Proxies: Evidence for Changing Synoptic Climate Regimes /A. V. Barber // Climatic Change. – 2004. – № 63. – P. 91-120.
- 40. Barbour, M. M., Andrei, T. J., Farquhar, G. D. Correlation between oxygen isotope ratios of wood constituents of *Quercus* and *Pinus* samples from around the world / M. M. Barbour // Aust. J. Plant Physiology. 2001. № 28. P. 335-348.
- 41. Battipaglia, G., Cherubini, P., Saurer, M., Siegwolf, R. T. W., Strumia, S., Cotrufo, M. F. Volcanic explosive eruptions of the Vesuvio decrease tree-ring growth but not photosynthetic rates in the surrounding forests / G. Battipaglia // Global Change Biology. 2007. № 13. P. 1-16.
- 42. Battipaglia, G., Saurer, M., Cherubini, P., Calfapietra, C., McCarthy, H. R., Norby, R. J., Cotrufo, F. Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites / G. Battipaglia // New Phytologist. – 2013. – № 197. – P. 544–554. – DOI: 10.1111/nph.12044.
- 43. Bellassen, V., Le Maire, G., Dhôte J. F., Ciais, P., Viovy, N. Modelling forest management within a global vegetation model Part 1: model structure and general behaviour / V. Bellassen // Ecological Modelling. 2010. № 221. P. 2458-2474.
- 44. Blackman, R. B., Tukey, J. The measurement of power spectra / R. B. Blackman // New York. 1958.
- 45. Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Cherverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stoff, G., Westermann, S., Wischnewski, K., Wille, C., Hubberten, H.-W. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena Rive Delta, Siberia (1998-2011) / J. Boike // Biogeosciences. 2013. № 10. P. 2105-2128.

- 46. Bonan, G. B., Williams, M., Fisher, R. A., Oleson, K. W. Modeling stomatal conductance in the earth system: linking leaf water-use efficiency and water transport along the soil– plant– atmosphere continuum / G. B. Bonan // Geosci. Model Dev. 2014. – № 7. – P. 2193 – 2222. DOI:10.5194/gmd-7-2193-2014.
- 47. Boninsegna, J. A., Hughes, M. K. Volcanic signals in temperature reconstructions based on tree-ring records for North and South America / J. A. Boninsegna // Interhemispheric climate linkages. – 2001. – P. 141-153.
- 48. Borella, S., Leuenberger, M., Saurer, M., Siegwolf, R. Reducing uncertainties in δ¹³C analysis of tree rings: Pooling, milling, and cellulose extraction / S. Borella // Journal of Geophysical Research. 1998. № 103. P. 19519–19526. DOI: 10.1029/98JD01169.
- 49. Bradley, R. S. Paleoclimatology. Reconstructing climate of the quaternary / R. S. Bradley // International geophysics Series. 1999. № 64. 613 p.
- 50. Bradley, R. S., Jones, P. D. Records of explosive volcanic eruptions over the last 500 years / R. S. Bradley, P. D. Jones (Eds.) //Climate since A.D. 1500. Routledge, New York. 1992. P. 606-622.
- 51. Briffa, K. R., Jones, P. D., Schweingruber, F. H. et al. Climatic variations and forcing mechanisms of the last 2000 years / P. Jones, R. Bradley, J. Jouzel, Eds. // Berlin, Springer-Verlag, 1996 a. – P. 9-41.
- 52. Briffa, K. R., Osborn, T. J., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Shiyatov, S. G., Vaganov, E. A. Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2, spatial-temporal variability and associated climate patterns / K. R. Briffa // The Holocene. 2002. № 12. P. 759-789.
- 53. Briffa, K. R. Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees / K. R. Briffa // Quaternary Science Reviews. – 2000. – № 19. – P. 87-105.
- 54. Briffa, K. R., Jones, P. D., Bartholin, T. S., et al. Fennoscandian summers from AD 500: temperature changes on short and long timescales / K. R. Briffa // Climate Dynamics. 1992.
 № 7. P. 111-119.
- 55. Briffa, K. R., Jones, P. D., Schweingruber F. H. et al. Unusual twentieth-century summer warmth in a 1000-year temperature record from Siberia / K. R. Briffa // Nature. – 1995. – № 376. – P. 156-159.

- 56. Briffa, K. R., Jones, P. D., Schweingruber, F. H., Karlen, W., Shiyatov, S. G. Tree-ring variables as proxy indicators: Problems with low-frequency signals /K. R. Briffa // Climate change and forcing mechanisms of the last 2000 years. Berlin: Springer, NATO ASI Series. 1996. № 141. P. 9-41.
- 57. Briffa, K. R., Jones, P. D., Schweingruber, F. H., Osborn, T. G. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperatures over the past 600 years / K. R. Briffa // Nature. – 1998. – № 393. – P. 450-455.
- 58. Brönnimann, S., Krämer, D. Tambora and the "Year without a summer" of 1816 / S. Brönnimann // A Perspective on Earth and Human. 2016.
- 59. Bryukhanova, M. V., Fonti, P., Kirdyanov, A. V., Siegwolf, R., Saurer, M., Pochebyt, N. P., Churakova (Sidorova), O. V., Prokushkin, A. S. The response of δ¹³C, δ¹⁸O and cell anatomy of *Larix gmelinii* tree rings to differing soil active layer depths / M. V. Bryukhanova // Dendrochronologia. – 2015. – № 34. – P. 51-59.
- 60. Büntgen, U., Myglan, V. S., Ljungqvist, F. C., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl M.,Kirdyanov, A. V. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD / U. Büntgen // Nature Geoscience. 2016. – № 9. – P. 231-236.
- 61. Butzin, M., Werner, M., Masson-Delmotte, V., Risi, C., Frankenberg, C., Gribanov, K., Jouzel, J., Zakharov, V. I. Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years / M. Butzin // Atmos. Chem. Phys. 2014. № 14. P. 5853-5869.
- 62. Cable, J. M., Ogle, K., Bolton, R. W., et al. Permafrost thaw affects boreal deciduous plant transpiration through increased soil water, deeper thaw and warmer soil / J. Cable // Ecohydrology. – 2013. – DOI: 10.10021eco.1423.
- 63. Calafat, F. M., Chambers, D. P., Tsimlis, M. N. Inter-annual to decadal sea-level veariability in the costal zones of the Norwegian and Siberian Seas: The role of atmospheric forcing / F. M. Calafat // Jounral of geophysical research: Oceans. 2013. № 118. P. 1287-1301. DOI: 10.1002/jgrc. 20106.
- 64. Cernusak, L., Ubierna, N., Winter, K., Holtum, J., Marshal, J., Farquhar, G. Environmental and physiological determinations of carbon isotope discrimination in terrestrial plants / L. Cernusak // New Phytologist. – 2013. – № 200 (4). – P. 950-965.

- 65. CH 2011. Swiss Climate Change Scenarios CH2011 // In. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC. 88 p.
- 66. Churakova (Sidorova), O. V., Bryukhanova, M., Saurer, M., Boettger, T., Naurzbaev, M., Myglan, V. S., Vaganov, E. A., Hughes, M. K., Siegwolf, R. T. W. A cluster of stratospheric volcanic eruptions in the AD 530s recorded in Siberian tree rings / O. V. Churakova (Sidorova) // Global and Planetary Change. – 2014. – № 122. – P. 140-150.
- 67. Churakova (Sidorova), O. V., Saurer, M., Bryukhanova, M., Siegwolf, R., Bigler, C. Sitespecific water-use strategies of mountain pine and larch to cope with recent climate change / O. V. Churakova (Sidorova) // Tree physiology. 2016a. № 36. P. 942–953. DOI: 10.1093/treephys/tpw060.
- 68. Churakova (Sidorova), O. V., Shashkin, A. V., Siegwolf, R., Spahni, R., Launois, T., Saurer M., Bryukhanova, M. V., Benkova, A. V., Kupzova, A. V., Vaganov, E. A., Peylin, P., Masson-Delmotte, V., Roden, J. Application of eco-physiological models to the climatic interpretation of δ¹³C and δ¹⁸O measured in Siberian larch tree-rings / O. V. Churakova (Sidorova) // Dendrochronologa, 2016 b. DOI:10.1016/j.dendro.2015.12.008.
- 69. Cook, E. R., Krusic, P. J. A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics (ARSTAN) / E. R. Cook // Ed. by E. R. Cook and P. J. Krusic – 2008.
- 70. Cornwell, W., Wright, I., Turner, J., Maire, V., Barbour, M., Cernusak, L., Dawson, T., Ellsworth, D., Farquhar, G., Griffiths, H., Keitel, C., Knohl, A., Reich, P., Williams, D., Bhaskar, R., Cornelissen, J., Richards, A., Schmidt, S., Valladares, F., Körner, C., Schulze, E., Buchmann, N., and Santiago, L. A global dataset of leaf ¹³C values, Dryad Digital Repository / W. Cornwell // http://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0029-7FF3-7. 2016.
- 71. Craig, H. Isotopic variations in meteoric waters / H. Craig // Science. 1961. № 133. P. 1702–1703.
- 72. Craig, H., Gordon, L. I. Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and marine atmosphere / H. Craig // In proc. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. 1965. Spoleto, Italy. Ed. by E. Tongiogi, V. Lishi F., Pisa. – P. 9-130.
- 73. Crowley, T. J. Causes of climate change over the past 1000 years / T. J. Crowley // Science.
 2000. № 298. P. 270-276.

- 74. D' Arrigo, R., Frank, D., Jacoby, G., Pederson, N. Spatial response to major volcanic events in or about AD. 536, 934 and 1258: Frost rings and other dendrochronological evidence from Mongolia and northern Siberia / R. D'Arrigo // Climatic Change. 1999. № 42. P. 31-34.
- 75. D'Alessandro, C. M., Guerrieri, M. R., Saracino, A. Comparing carbon isotope composition of bulk wood and holocellulose from *Quercus cerris*, *Fraxinus ornus* and *Pinus radiata* tree rings / C. M. D'Alessandro // Forest. – 2004. – № 1. – P. 51–57.
- 76. D'Arrigo, R., Wilson, R., Ancukaitis, K. J. Volcanic cooling signal in tree ring temperature records for the past millennium / R. D'Arrigo // J. Geophys. Res. – 2013. – № 118 (16). – P. 9000-9010.
- 77. D'Arrigo, R., Wilson, R., Liepert, B., Cherubini, P. On the "Divergence Problem" in Northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes / R. D'Arrigo // Global and Planetary Change. – 2008. – 60. – P. 289–305.
- 78. D'Arrigo, R. D., Jacoby, G. C., Frank, D., Pederson, N. D., Cook, E., Buckly, B. M., Nachin, B., Mijidorj, R., Dugarjav, C. 1738-years of Mongolian temperature variability inferred from a tree-ring width chronology of Siberian pine / R. D. D'Arrigo // Geophisycal Research Letters. 2001. Vol. 28. №3. P. 543-546.
- 79. Danis, P.-A., Hatté, L., Misson, L., Guiot, J.: MAIDENiso: a multiproxy biophysical model of tree-ring width and oxygen and carbon isotopes / P.-A. Danis // Can. J. Forest Res. 2012.
 № 42. P. 1697–1713. doi:10.1139/x2012-089.
- 80. Dansgaard, W. Stable isotopes in precipitation / W. Dansgaard // Tellus 1964. № 16. P. 436–468.
- 81. Deleuze, C., Pain, O., Dhôte, J. F., Hervé, J. C. A flexible radial increment model for individual trees in pure even-aged stands / C. Deleuze // Annals of Forest Science. – 2004. – № 61. – P. 327-335.
- 82. Dongmann, G., Nürnberg, H. W., Förstel, H., Wagener, K. On the enrichment of H₂¹⁸O in the leaves of transpiring plants / G. Dongmann // Radiation and Environmental Biophysics. 1974. № 11. P. 41-52.
- 83. Duarte, H. F., Raczka, B. M., Ricciuto, D. M., Lin, J. C., Koven, C.D., Thornton, P. E., Bowling, D. R., Lai, C.-T., Bible, K. J., Ehleringer, J. R. Evaluating the community land

model (CLM 4.5) at a coniferous forest site in Northwestern United States using flux and carbon-isotope measurements / H. F. Duarte // Biogeosciences Discuss. – 2016. – DOI:10.5194/bg-2016-441.

- 84. Duffy, J. E., McCarroll, D., Barnes, A., Ramsey, C. B., Davies, D., Loader, N. J., Miles, D., Young, G. H. F. Short-lived juvenile effects observed in stable carbon and oxygen isotopes of UK oak trees and historic building timbers / J. E. Duffy // Chemical Geology. – 2017. – DOI.org/10.1016/j.chemgeo.2017.09.007.
- 85. Durbin, J., Watson, G. S. Testing for serial correlation in least squares regression. III. / J. Durbin // Biometrika. 1971. № 58 (1). P. 1–19. DOI:10.2307/2334313.
- 86. Edwards, T. W., Birks, S. J., Luckman, B. H., MacDonald, G. M. Climatic and hydrologic variability during the past millennium in the eastern Rocky Mountains and northern Great Plains of western Canada / T. W. Edwards // Quaternary Res. 2008. № 70. P. 188–197.
- 87. Ehleringer, J. R., Vogel, J. C. Historical aspects of stable isotopes in plant carbon and water relations / J. R. Ehleringer // In J. R. Ehleringer, A. E. Hall, and G. D. Farquhar (Ed.) // Stable Isotopes and Plant Carbon/Water Relations, 1993. Academic Press, San Diego. – P. 9-19.
- 88. Eichler, A., Oliver, S., Henderson, K., Laube, A., Beer, J., Papina, T., Gäggeler, H. W., Schwikowski, M. Temperature response in the Altai region lags solar forcing / A. Eichler // Geophysical Res. Lett. – 2009.
- 89. Erlandsson, S. Dendrochronological studies / S. Erlandsson // Upsala: Almqvist and Wiksells. 1936. 119 p.
- 90. Eronen, M., Hyvarinen, H., Zetterberg, P. Holocene changes in humidity inferred from lake sediment and submerged Scots pine dated by tree rings in northern Finnish Lapland / M. Eronen // The Holocene. – 1999. – № 9. – P. 569-580.
- 91. Esper, J., Cook, E. R., Schweingruber, F. H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability / J. Esper // Science. 2002. – № 295. – P. 2250-2253.
- 92. Esper, J., Frank, D., Timonen, M., Zorita, E., Wilson, R., Luterbacher, J., Holzkämper, S., Fischer, E. M., Wagner, S., Nievergelt, D., Verstege, A., Büntgen, U. Orbital forcing of treering data / J. Esper // Nature Climate Change. – 2012. – DOI:10.1038/nclimate1589.

- 93. Farquhar, G., Lloyd, J. Carbon and oxygen isotope effects in the exchange of carbon dioxide between terrestrial plants and the atmosphere / G. Farquhar // In Ehleringer, J. R., Hall, A. E. – 1993.
- 94. Farquhar, G. D. / G. D. Farquhar // Eds. Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations. Academic Press, San Diego. – 1982. – P. 47–70.
- 95. Farquhar, G. D., Hubick, K. T., Condon, A. G., Richards, R. A. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency / G. D. Farquhar // In P.W. Rundel, J.R. Ehleringer, K.A. Nagy, Eds. Stable Isotopes in Ecological Research. – 1989. Springer-Verlag, New York. – P. 21–40.
- 96. Fischer, H., Meissner, K. J., Mix, A. C., Abram, N. J., Austermann, J., Brovkin, V., Capron, E., Colombaroli, D., Daniau, A. L., Dyez, K. A., Felis, T., Finkelstein, S. A., Jaccard, S. K., McClymont, E. L., Rovere, A., Sutter, J., Wolff, E. W., Affolter, S., Bakker, P., Ballesteros-Cánovas, J. A., Barbante, C., Caley, T., Carlson, A. E., Churakova (Sidorova), O., et al. Paleoclimate constraints on a future warmer world / H. Fischer // Nature geoscience. 2018.
- 97. Flanagan, L. B., Comstock, J. P., Ehleringer J. R., 1991. Comparison of modeled and observed environmental influences on the stable oxygen and hydrogen isotope composition of leaf water in *Phaseolus vulgaris* L. / L. B. Flanagan // Plant Physiology. 1991. № 96. P. 588-596.
- 98. Fletcher, J. The centuries for oaks of southern and eastern England / J. Fletcher // Journal of Archaeology Science. – 1977. – № 4 (4). – P. 335-352.
- 99. Fonti, P., Bryukhanova, M. V., Myglan, V. S., Kirdyanov, A. V., Naumova, O. V., Vaganov, E. A. Temperature-induced responses of xylem structure of *Larix sibirica* from Russian Altay / P. Fonti // American Journal of Botany. 2013. № 100 (7). P. 1-12.
- 100. Francey, R. J., Allison, C. E., Etheridge, D. M., et al. A 1000-year high precision record of δ¹³C in atmospheric CO₂/R. J. Francey // Tellus. 1999. № B 51. P. 170-193.
- Frank, D. C., Poulter, B., Saurer, M., Esper, J., Huntingford, C., Helle, G., Treydte, K., Zimmermann, N. E., Schleser, G. H., Ahlstrom, A., Ciais, P., Friedlingstein, P., Levis, S., Lomas, M., Sitch, S., Viovy, N., Andreu-Hayles, L., Bednarz, Z., Berninger, F., Boettger, T., D'Alessandro, C. M., Daux, V., Filot, M., Grabner, M., Gutierrez, E., Haupt, M.,

Hilasvuori, E., Jungner, H., Kalela-Brundin, M., Krapiec, M., Leuenberger, M., Loader, N.
J., Marah, H., Masson-Delmotte, V., Pazdur, A., Pawelczyk, S., Pierre, M., Planells, O.,
Pukiene, R., Reynolds-Henne, C. E., Rinne, K. T., Saracino, A., Sonninen, E., Stievenard,
M., Switsur, V. R., Szczepanek, M., Szychowska-Krapiec, E., Todaro, L., Waterhouse, J. S.,
and Weigl, M. Water-use efficiency and transpiration across European forests during the
Anthropocene. / D. C. Frank // Nature Climate Change. – 2015. – № 5. – P. 579–583.

- Fritts, H. C. Tree-rings and climate / Fritts H. C. // London. New York; San Francisco:
 Acad. Press. 1976. 567 p.
- 103. Fyodorov-Davydov, D. G., Kholodov, V. E., Kraev, G. N., Sorokovikov, V. A., Davydov, S. P., Merekalova, A. A. Seasonal thaw of soils in the North Yakutian ecosystems. V International Conference on Cryopedology "Diversity of forest affected soils and their role in ecosystems" / D. G. Fyodorov-Davydov // At Ulan-Ude, Buryatia, Russia, September 14-20. – 2009.
- 104. Gagen, M. H., McCarroll, D., Loader, N. J., Robertson, I. Stable Isotopes in Dendroclimatology: Moving Beyond "Potential" // Dendroclimatology. – 2010. – № 11. – P. 147.
- 105. Gagen, M. H., McCarroll, D., Loader, N. J., Robertson, I., Jalkanen, R. Exorcising the 'segment length curse' summer temperature reconstruction since AD 1640 using non detrend stable carbon isotope ratios from line trees in northern Finland / M. H. Gagen // The Holocene. – 2007. – № 17. – P. 433-444.
- 106. Gagen, M. H., McCarroll, D., Robertson, I., Loader, N. J., Jalkanen, R. Do tree-ring δ¹³C series from *Pinus sylvestris* in northern Fennoscandia contain long-term non-climatic trends? / M. H. Gagen // Chemical Geology. – 2008. – № 252. – P. 42-51.
- 107. Gagen, M., McCarroll, D., Jalkanen, R., Loader, N., Robertson, I., Young, G. A rapid method for the production of robust millennial length stable isotope tree-ring series for climate reconstruction / M. Gagen // Global and Planetary Change. – 2012. – № 96. – P. 82-83.
- Gagen, M., Zorita, E., McCarroll, D., Young, G., Grudd, H., Jalkanen, R., Loader, N., Robertson, I., Kirchhefer, A. Cloud response to summer temperatures in Fennoscandia over

the last thousand years / M. Gagen // Geophysical Research Letters, 2011. – № 38(5). DOI:10.1029/2010GL046216.

- 109. Gagen, M., Zorita, E., McCarroll, D., Zahn, M., Young, G., Robertson, I. North Atlantic summer storm tracks over Europe dominated by internal variability over the past millennium / M. Gagen // Nature Geoscience. – 2016. – № 9(8). – P. 630-635.
- Gennaretti, F., Huard, D., Naulier, M., Savard, M., Bégin, C., Arseneault, D., Guiot, J. Bayesian multiproxy temperature reconstruction with black spruce ring widths and stable isotopes from the northern Quebec taiga / F. Gennaretti // Clym. Dyn. 2017. DOI: 10.1007/s00382-017-3565-5.
- Gerten, D., Schaphoff, S., Haberlandt, U., Lucht, W., Sitch, S. Terrestrial vegetation and water balance hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model / D. Gerten // J. Hydrology. 2004. № 286. P. 249-270.
- 112. Gessler, A., Ferrio, J.P., Hommel, R., Treydte, K., Werner, R.A., Monson R.K. Stable isotopes in tree rings: towards a mechanistic understanding of isotope fractionation and mixing processes from the leaves to the wood / A. Gessler // Tree physiology. 2014. № 34(8). P. 796-818. DOI: 10.1093/treephys/tpu040.
- Ghimire, B., Riley, W. J., Koven, C. D., Mu, M., Randerson, J. T. Representing leaf and root physiological traits in CLM improves global carbon and nitrogen cycling predictions / B. Ghimire // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2016. № 8. P. 598–613. DOI:10.1002/2015MS000538.
- Gillett, N. P., Weaver, A. J., Zwiers, F. W. Wehner, M. F. Detection of volcanic influence on global precipitation / N. P. Gillett // Geophysical Research Letters. 2004. № 31 (12). DOI:10.1029/2004GL020044R.
- Graybill, D. A., Shiyatov, S. G. Dendroclimatic evidence from the northern Soviet Union // Climate since A.D. 1500 / Eds. R. S. Bradley, P. D. Jones. – London. New York: Routledge. – 1992. – P. 397-341.
- Groisman, P. Ya. Possible regional climate consequences of the Pinatubo eruption /
 P. Groisman // Geophys. Res. Lett. 1992. № 19. P. 1603–1606.

- 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. № 31. P. 843–857.
- Grudd, H., Briffa, K. R., Karlen, W., Bartholin, T. S., Jones, P. D., Kromer, B. A 7400 year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales / H. Grudd // The Holocene. 2002. № 12.
 6. P. 657-665.
- Guffey, K. M. Substantial contribution to sea-level rise during the last interglacial from the Greenland ice sheet / K. M. Guffey // Nature. – 2000. – №. 404. – P. 591-594.
- Guille, S., Corona, C., Stoffel, M., Khodri, M., Lavigne, F., Ortega, P., Eckert, N., Selenniou, P., Daux, V., Churakova (Sidorova), O. V., et al. Climate response to the Samalas volcanic eruption in 1257 revealed by proxy records / S. Guille // Nature geoscience. 2017.
 Nº 10. P. 123-128. DOI:10.1038/ngeo2875.
- 121. Guiot, J. ARMA techniques for modeling tree-ring response to climate and for reconstruction variations of paleoclimates / J. Guiot // Ecological Modeling. 1986. № 33. P. 149-171.
- Helle, G., Schleser, G. H. Beyond CO₂-fixation by rubisco—an interpretation of ¹³C/¹²C variations in tree rings from novel intra-seasonal studies on broad-leaf trees / G. Helle // Plant, Cell and Environment. 2004. № 27(3). P. 367–380.
- Henderson, K., Laube, A., Gäggeler, H. W., Olivier, S., Papina, T., Schwikowski, M. Temporal variations of accumulation and temperature during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai / K. Henderson // Geophys Res Lett. 2006. № 111. DOI: 10.1029/2005JD005830.
- Hettmansperger, T. / T. Hettmansperger // Statistical Inference Based on Ranks.
 Wiley & Sons, Incorporated, John. 323 p.
- 125. Hilasvuori, E., Berninger, F., Sonninen, E., Tuomenvirta, H., and Jungner, H. Stability of climate signal in carbon and oxygen isotope records and ring width from Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Finland / E. Hilasvuori // Quaternary Science. 2009. № 24. P. 469-480.

- Hodges, G. The new cold war. Stalking arctic climate change by submarine /G.
 Hodges // National Geographic. 2000. P. 30–41.
- 127. Hollstein, E. Wood technology and the dating of oak: West German chronologies for oak and beech / E. Hollstein // DE. – 1978.
- Holmes, R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement
 / R. L. Holmes // Tree-ring Bulletin, 1983. №. 44. P. 69-75.
- 129. Holmes, R. L., Adams, R. K., Fritts, H. C. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and Northern Great basin with procedures used in chronology department work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN chronology series Tucson, Arizona, Laboratory of Tree-Ring Research / R. L. Holmes // University of Arizona. – 1986.
- Huber, B. Uber die Sicherheit jahrringchroologischer datierung / B. Huber // Holz als.
 Roh-und Werkstoff. 1943. № 6 (10/12). Berlin-Goettingen-Heideldberg.
- Hughes, M. K., Vaganov, E. A., Shiyatov, S. G., Touchan, R., Funkhouser G. Twentieth-century summer warmth in northern Yakutia in a 600-year context / M. K. Hughes // The Holocene. 1999. № 9.5. P. 603-608.
- 132. Iles, C. E., Hegerl, G. C. The global precipitation response to volcanic eruptions in the CMIP5 models / C. E. Iles // Environ. Res. Lett. – 2014. – 9. doi:10.1088/1748-9326/9/10/104012.
- 133. IPCC report. // 4-th Assessment report Intergovernmental panel on climate change. 2007.
 P. 434-497.
- 134. IPCC. 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 / Pachauri, R. K., Meyer, L. A. eds. // IPCC, Geneva, Switzerland. – 2014. – P. 151.
- 135. Jaggi, M., Saurer, M., Siegwolf. R. T. W. Seasonality of δ¹⁸O in needles and wood of *Picea* abies. / M. Jaggi // New Phytologist. 2003. doi: 10.1046/j.1469-8137.2003.00711.x.
- 136. Jones, P. D., Briffa, K. R., Barnett, T. P., Tett, S. F. B. High resolution paleoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control run temperatures / P. D. Jones // The Holocene. – 1998. – № 8. – P. 467-473.

- 137. Joussaume, S., Jouzel, J. Simulation of Paleoclimatic Tracers Using Atmospheric General Circulation Models // Berger W.H., Labeyrie L.D. (eds) Abrupt Climatic Change. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Pysical Sciences). Springer, Dordrecht. 1987. – № 369. – P. 381.
- 138. Jouzel, J., G.L. Russell, R.J. Suozzo, D. Koster, J.W.C. White, and W.S. Broecker. Simulations of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS general circulation model: The seasonal cycle for present-day conditions / J. Jouzel // J. Geophys. Res. 1987. – № 92. – P. 14739-14760 – DOI: 10.1029/JD092iD12p14739.
- 139. Kagawa, A., Naito, D., Sugimoto, A., Maximov, T. C. Effects of spatial variability in soil moisture on widths and δ¹³C values of eastern Siberian tree rings / A. Kagawa // J. Geophys. Res. 2003. № 108. D164500, DOI:10.1029/2002JD003019.
- 140. Kalugin, I., Daryin, A., Smolyaninova, L., Andreev, A., Diekmann, B., Khlystov, O. 800yr-long records of annual air temperature and precipitation over southern Siberia inferred from Teletskoye lake sediments / I. Kalugin // Quat. Res. – 2007. – № 67. – P. 400–410.
- 141. Kaufman, D. S., Schneider, D. P., McKay, N. P., Ammann, C. M., Bradley, R. S., Briffa, K. R., Miller, G. H., Otto-Bliesner, D. L., Overpeck, J. T., Vinther, B. M., Members, A. L. Recent warming reverses long-term Arctic cooling / D. S. Kaufman // Science. 2009. № 325. P. 1236-1239.
- 142. Keenan, T. F., Hollinger, D. Y., Bohrer, G., Dragoni, D., Munger, J. W., Schmid, H. P., Richardson, A. D. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise / T. F. Keenan // Nature. 2013. № 499. P. 324–327. DOI:10.1038/nature12291.
- 143. Keller, K. M., Lienert, S., Bozbiyik, A., Stocker, T.F., Churakova (Sidorova), O. V., Frank, D. C., Klesse, S., Koven, C. D., Leuenberger, M., Riley, W. J., Saurer, M., Siegwolf, R. T. W., Weigt, R. B., Joos, F. 20th-century changes in carbon isotopes and water-use efficiency: Tree-ring based evaluation of the CLM4.5 and LPX-Bern models / K. M. Keller // Biogeosciences. 2017. № 14. P. 2641–2673.
- 144. Kimak, A. Leuenberger, M. Are carbohydrate storage strategies of trees traceable by early–latewood carbon isotope differences? / A. Kimak // Trees. 2015. № 29. P. 859–870. DOI:10.1007/s00468-015-1167-6, 2015.
- 145. Kirdyanov, A. V., Vaganov, E. A., Hughes, M. K. Separating the climatic signal from treering width and maximum latewood density records / A. V. Kirdyanov // Trees. – 2008. – P. 37–44.
- 146. Klein, T., Bader, M. K. F., Leuzinger, S., Mildner, M., Schleppi, P., Siegwolf, R. T., Körner, C. Growth and carbon relations of mature *Picea abies* trees under 5 years of free-air CO₂ enrichment / T. Klein // Journal of Ecology. 2007. № 104. P. 1720–1733. DOI:10.1111/1365-2745.12621.
- 147. Knorre, A. A., Siegwolf, R. T.W., Saurer, M., Sidorova, O. V., Vaganov, E. A., and Kirdyanov, A. V. Twentieth century trends in tree ring stable isotopes (δ¹³C and δ¹⁸O) of *Larix sibirica* under dry conditions in the forest steppe in Siberia / A. A. Knorre // Journal of Geophysical Research Biogeosciences. – 2010. – № 115. – DOI:10.1029/2009JG000930.
- 148. Knorre, A. A., Kirdyanov, A. A., Vaganov, E. A. Climatically induced interannual variability in aboveground production in forest-tundra and northern taiga of central Siberia / A. A. Knorre // Oecologia. 2006. № 147. P. 86–95. DOI:10.1007/s00442-005-0248-4.
- 149. Körner, Ch. A matter of tree longevity / Ch. Körner // Science. 2017. № 355. P.
 130-131.
- 150. Körner, Ch. Paradigm shift in plant growth control / Ch. Körner // Curr. Opinion Plant Biol. 2015. № 25. P. 107-114.
- Körner, Ch. Alpine tree lines / Ch. Körner // Springer, Basel. 2012. ISBN 978-3-0348-0395-3.
- 152. Körner, Ch., Asshoff, R., Bignucolo, O., Hättenschwiler, S., Keel, S. G., Peláez-Riedl, S., Pepin, S., Siegwolf, R. T. W., Zotz, G. Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. / Ch. Körner // – Science. 2005. – № 309. – P. 1360-1362.
- 153. Krakauer, N. Y., Randerson, J. T., Primeau, F. W., Gruber, N., Menemenlis, D. Carbon isotope evidence for the latitudinal distribution and wind speed dependence of the air-sea gas transfer velocity / N. Y. Krakauer // Tellus B. 2006. № 58. P. 390–417. DOI:10.1111/j.1600 0889.2006.00223.x.
- 154. Kremenski, C., Boettger, T., McDonald, G. M., Hiller, A. Medieval climate warming and aridity as indicated by multiproxy evidence from the Kola Peninsula, Russia / C.

Kremenski // Palaeogeography, Palaeoclimatology & Palaeoecology. – 2004. – № 209(1). – P. 113-125.

- 155. Kress, A., Hangartner, S., Bugmann, H., Büntgen, U., Frank, D. C., Leuenberger, M., Siegwolf, R. T. W., Saurer, M. Swiss tree rings reveal warm and wet summers during medieval times / A. Kress // Geoph. Res. Lett. – 2014. – № 41. – P. 1732 – 1737. DOI:10.1002/2013GL059081.
- 156. Kress, A., Saurer, M., Siegwolf, R. T. W., Frank, D. C., Esper, J., Bugmann, H. A
 350 year reconstruction from Alpine tree ring stable isotopes / A. Kress // Global
 biogeochemical cycles. 2010. № 24. GB2011. DOI: 10.1029/2009CB003613.
- 157. Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogee, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I. C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere–biosphere system / G. Krinner // Glob. Biogeochem. Cycles. 2005. № 19. GB1015. DOI:10.1029/2003GB002199.
- 158. Lacis, A. A., Hansen, J. E., Sato, M. Climate forcing by stratospheric aerosols /A. A. Lacis // Geophys. Res. Lett. 1992. № 19. P. 1607–1610.
- 159. LaMarche V. C. Jr., Hirschboeck K. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions / V. C. LaMarche // Nature. – 1984. – № 307. – P. 121-126.
- 160. Lamb, H. H. Climate: Present, Past and Future. Climate History and Future / H. H. Lamb // London, Methuen. 1977. 603 p.
- Lavigne, F., Degeai, J.-P., Komorowski, J.-C., Guillet, S., Robert, V., Lahitte, P., Oppenheimer, C., Stoffel, M., Vidal, C.M., Suro, I.P., Wassmer, P., Hajdas, I., Hadmoko, D. S., Belizal, E. Source of the great A.D. 1257 mystery eruption unveiled, Samalas volcano, Rinjani Volcanic Complex, Indonesia. Proc Natl Acad Sci. 2013. № 110. P. 16742–16747. DOI:10.1073/pnas.1307520110.
- Leavitt, S. W., Chase, T. N., Rajagopalan, B., Lee, E., Lawrence, P. J., Woodhouse, C. A. Southwestern U.S. drought maps from pinyon tree-ring carbon isotopes, Eos Trans, 2007. № 88. P. 39–40. DOI:10.1029/2007EO040005.
- 163. Leavitt, S. W., Danzer, S. R. Methods for batch processing small wood samples to holocellulose for stable-carbon isotope analysis. Anal. Chem. – 1992. – № 65. P. – 87–89.

- Leonardi, S., Gentilesca, T., Guerrieri, R., Ripullone, F., Magnani, F., Mencuccini, M., Noije, T. V., and Borghetti, M. Assessing the effects of nitrogen deposition and climate on carbon isotope discrimination and intrinsic water-use efficiency of angiosperm and conifer trees under rising CO₂ conditions. / S. Leonardi // Global Change Biology. 2012. № 18. P. 2925–2944. DOI:10.1111/j.1365-2486.2012.02757.x.
- 165. Lévesque, M., Siegwolf, R., Saurer, M., Eilmann, B., Rigling, A. Increased water-use efficiency does not lead to enhanced tree growth under xeric and mesic conditions / M. Lévesque // New Phytologist. 2014. № 203. P. 94–109. DOI:10.1111/nph.12772.
- 166. Liu, J., Chen, F., Chen, J., Zhang, X., Liu, J., Bloemendal, J. Weakening of the East Asian summer monsoon at 1000-1100 A.D. within the Medieval Climate Anomaly: Possible linkage to changes in the Indian Ocean-western Pacific / J. Liu // Journal of Geophysical Research Atmospheres. – 2014. – № 119. – P. 2209–2219.
- 167. Loader, N. J., Robertson, I., Barker, A. C., Switsur, V. R., Waterhouse, J. S. Improved technique for the batch processing of small whole wood samples to alpha-cellulose / N. J. Loader // Chemical Geology. – 1997. – № 136. – P. 313-317.
- 168. Loader, N. J., Helle, G., Los, S., Lehmkuhl, F., Schleser, G. H. Twentieth-century summer temperature variability in the southern Altai Mountains: A carbon and oxygen isotope study of tree-rings / N. J. Loader // The Holocene. 2010. № 20. P. 1149–1156.
- 169. Loader, N. J., Robertson, I., McCarroll, D. Comparison of stable carbon isotope ratios in the whole wood, cellulose and lignin of oak tree rings / N. J. Loader // Palaeogeography, Palaeoclimatology. Palaeoecology. – 2003. – № 196. – P. 395–407.
- Loader, N. J., Young, G. H. F., Grudd, H., McCarroll, D. Stable carbon isotopes from Torneträsk, norther Sweden provide a millennial length reconstruction of summer sunshine and its relationship to Arctic circulation / N. J. Loader // Quaternary Science Reviews. – 2013. – № 62. – P. 97-113.
- 171. Luo, Y. H., Sternberg, L. Hydrogen and oxygen isotope fractionation during heterotrophic cellulose synthesis / Y. H. Luo // J. Exp. Bot. 1992. № 43. P. 47–50.
- Majoube, M. Fractionnement en oxygène-18 et en deutèrium entre l'eau et sa vapeur
 / M. Majoube // J. Chim. Phys. 1971. № 58. P. 1423–1436.

- Mann, M. E., Bradley, R. S., Hughes, M. K. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries / M. E. Mann // Nature. 1998. № 392/23. P. 779-787.
- Mann, M. E., Zhang, Z., Hughes, M. K., Bradley, R. S., Miller, S., Rutherford, S., Ni, F. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia /M. E. Mann // Proc. Nat. Acad. Sci. 2008. № 105. P. 13252–13257.
- Mann, M., Jones, P. Global surface temperatures over the past two millennia / M.Mann. 2003.
- 176. Mann, M. E., Bradley, R. S., Hughes, M. K. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries / M. E. Mann // Nature. – 1998. – № 392/23. – P. 779-787.
- 177. Mann, M. E., Fuentes, J. D., Rutherford, S. Underestimation of volcanic cooling in tree-ring- based reconstructions of hemispheric temperatures / M. E. Mann // Nature Geoscience. – 2012. – DOI:10.1038/NGEO1394.
- 178. Mayewski, P. A., Rohlingb, E. E., Stagerc, J. C., Karlend, W., Maascha, K. A., Meekere, L. D., Meyersona, E. A., Gassef, F., Kreveldg, S., Holmgrend, K., Lee-Thorph, J., Rosqvistd, G., Racki, F., Staubwasserj, M., Schneiderk, R. R., Steigl, E. J. Holocene climate variability / P. A. Mayewski // Quaternary Research. – 2004. – № 62. – P. 243–255.
- McCarroll, D., Loader, N. J. Stable isotopes in tree rings / D. McCarroll // Quaternary
 Science Reviews. 2004. № 23. P. 771–801.
- 180. McCarroll, D., Gagen, M. H., Loader, N. J., Robertson, I., Anchukaitis, K. J., Los, S., Young, G. H. F., Jalkanen, R., Kirchhefer, A. Waterhouse, J. S. Correction of tree ring stable carbon isotope chronologies for changes in the carbon dioxide content of the atmosphere / D. McCarroll // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2009. – № 73. – P. 1539-1547.
- 181. McCarroll, D., Jalkanen, R., Hicks, S., Tuovinen, M., Pawellek, F., Gagen, M., Eckstein, D., Schmitt, U., Autio, J., Heikkinen, O. Multi-proxy dendroclimatology: a pilot study in northern Finland / D. McCarroll // The Holocene. – 2003. – № 13. – P. 829-838.
- 182. McCarroll, D., Loader, N. J. Stable isotopes in tree rings / D. McCarroll // Quaternary Science Review. – 2004. – № 23. – P. 771-801.

- 183. Meese, D. A., Alley, R. ., Gow, A. J. The accumulation record from the GISP2 core as an indicator of climate change throughout the Holocene / D. A. Meese // Science. 1994. № 266. P. 1680-1682.
- Meiert, P., Stuiver, M. GISP2 Oxygen Isotope Data / P. Meiert // PANGAEA. 1999.
 https://DOI.org/10.1594/PANGAEA.56094
- 185. Melayah, A., Bruckler, L., Bariac, T. Modeling the transport of water stable isotopes in unsaturated soils under natural conditions 1. Theory /A. Melayah // Water Resources Research. – 1996. – № 32. – DOI: 10.1029/96WR00674. P. 1043-1397.
- 186. Methods of Dendrochronology. Applications in the environmental sciences / Eds.
 Cook E. R., Kairiukstis L. A. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ. 1990. 394 p.
- 187. Myglan, V. S., Oidupaa, O. Ch., Kirdyanov, A. V., Vaganov, E. A. 1929-year treering chronology for Altai-Sayan region (Western Tuva) / V. S. Myglan // Journal of archeology, ethnography and anthropology of Eurasia. – 2008. – № 4 (36). – P. 25-31.
- 188. Naulier, M., Savard, M. M., Bégin, C., Gennaretti, F., Arseneault, D., Marion, J., Nicault, A., Bégin, Y. A millennial summer temperature reconstruction for northeastern Canada using oxygen isotopes in subfossil trees / M. Naulier // Clim. Past. – 2015. – № 11. – P. 1153-1164. – https://DOI.org/10.5194/cp-11-1153-2015.
- 189. Naurzbaev, M. M., Vaganov, E. A., Sidorova, O. V., Schweingruber, F. H. Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series / M. M. Naurzbaev // The Holocene. – 2002. – № 12.6. – P. 727-736.
- New, M., Hulme, M., Jones, P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961–90 Mean Monthly Terrestrial Climatology /M. New // J. Climate. 1999. № 12. P. 829–856.
- 191. Nye, J. F. Correction factor for accumulation measured by the thickness of the annual layers in ice sheets / J. F. Nye // J. Glaciology. 1963. № 4 (36). P. 785–788.
- Oleson, K. W., Lawrence, D. M., Bonan, G. B., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C. D., Levis, S., Li, F., Riley, W. J., Subin, Z. M., Swenson, S. C., Thornton, P. E., Bozbiyik, A., Fisher, R., Kluzek, E., Lamarque, J.-F., Lawrence, P. J., Leung, L. R., Lipscomb, W.,

Muszala, S., Ricciuto, D. M., Sacks, W., Sun, Y., Tang, J., Yang, Z.-L. Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM), NCAR/TN-503+STR, Tech. rep. / K. W. Oleson // National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, USA. – 2013.

- 193. Opel, T., Fritzsche, D., Meyer, H. Eurasian Arctic climate over the past millennium as recorded in the Akademii Nauk ice core (Severnaya Zemlya) / T. Opel // Climate of the Past Discussions. – 2013. – № 9. – P. 2401-2413.
- Panushkina, I. P., Ovchinnikov, D. V., Adamenko, M. F. Mixed response of decadal variability in larch tree-ring chronologies from upper tree lines of the Russian Altai / I. P. Panushkina // Tree Ring Res. 2005. № 61(1). P. 33–42. DOI:10.3959/1536-1098-61.1.33.
- Pearcy R. W., Schulze E.-D., Zimmermann R. Measurement of transpiration and leaf conductance / R. W. Pearcy // In Plant Physiological Ecology. Pearcy, R. W., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Rundel, P. W. eds. London: Chapman and Hall, 1989.
- 196. Kenan, Ü., Pearson, C., Hauck, D. K., Kuniholm, P. I. Dating volcanic eruptions with tree-ring chemistry // IEEE Potentials. 2009. DOI: 10/1109/MPOT.2009.934193.
- 197. Plant physiological ecology field methods and instrumentation / R. W. Pearcy, J. R., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Rundel, P. W. Eds. // London New York.
- 198. Prentice, I. C., Dong, N., Gleason, S. M., Maire, V., Wright, I. J. Balancing the costs of carbon gain and water transport: testing a new theoretical framework for plant functional ecology / I. C. Prentice // Ecol. Lett. 2014. № 17. P. 82–91. DOI:10.1111/ele.12211.
- 199. Raczka, B., Duarte, H. F., Koven, C. D., Ricciuto, D., Thornton, P. E., Lin, J. C., Bowling, D. R. An observational constraint on stomatal function in forests: evaluating coupled carbon and water vapor exchange with carbon isotopes in the Community Land Model (CLM4.5) / B. Raczka // Biogeosciences. 2016. № 13. P. 5183–5204. DOI: 10.5194/bg-13-5183-2016.
- 200. Richardson, C. W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation / C. W. Richardson // Water Resources Research. 1981. № 17(1). P. 182-190.
- 201. Rinn, F. Tsap V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation / F. Rinn // Bierhelder weg 20, D-69126, Heidelberg. Germany. 1996. 263 p.

- 202. Robertson, I., Rolfe, J., Switsur, V. R., Carter, A. H. C., Hall, M. A., Barker, A. C., and Waterhouse, J. S. Signal strength and climate relationships in ¹³C/¹²C ratios of tree ring cellulose from oak in southwest Finland / I. Robertson // Geophys. Res. Lett. 1997. № 24. P. 1487–1490. DOI:10.1029/97GL01293.
- 203. Robock, A. Volcanic eruptions and climate / A. Robock // Reviews of Geophysics. –
 2000. № 38 (2). P. 191-219.
- 204. Robock, A., Mao, J. Winter warming from large volcanic eruptions // Geophysical Research Letters. 1992. № 19. P. 2405-2408.
- 205. Robock, A., Yuhe, L. The volcanic signal in Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model simulations / A. Robock // J. Climate. 1994. № 7. P. 44-55.
- 206. Roden, J. S., Lin, G., Ehleringer, J. R. A mechanistic model for interpretation of hydrogen and oxygen isotopic ratios in tree-ring cellulose / J. S. Roden // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2000. – № 64. – P. 21-35.
- 207. Ruess, R. W., Hendrick, R. L., Vogel, J. G., Sveinbjornsson, B. The role of fine roots in the functioning of Alaskan boreal forests. In Alaska's Changing Boreal Forest / F. S. Chapin, M. W. Oswood, K. Van Cleve, L. A. Viereck, D. L. Verbyla, Eds. // Oxford University Press: New York. – 2006. – 354 p.
- Sage, R. F., Sharkey, T. D., Seemann, J. R. Acclimation of photosynthesis to elevated CO₂ in five C₃ species / R. F. Sage // Plant Physiology. 1989. № 89. P. 590–596.
- 209. Salzer, M. W., Hughes, M. K. Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 yr / M. W. Salzer // Quaternary Research. 2007. № 67. P. 57-68.
- Saurer, M., Aellen, K., Siegwolf, R. Correlating δ¹³C and δ¹⁸O in cellulose of trees /
 M. Saurer // Plant Cell and Environment. 1997. № 20. P. 1543–1550.
- Saurer, M., Cherubini, P., Siegwolf, R. Oxygen isotopes in tree rings of *Abies alba*: The climatic significance of inter-decadal variations / M. Saurer // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2000. № 105. P. 12461 12470.– DOI:10.1029/2000JD 900160.
- 212. Saurer, M., Kirdyanov, A. V., Prokushkin, A. S., Rinne, K. T., Siegwolf, R. T. W. The impact of an inverse climate-isotope relationship in soil water on the oxygen-isotope

composition of *Larix gmelinii* in Siberia / M. Saurer // New Phytologist. – 2016. – № 209(3). – P. 955-964.

- Saurer, M., Kress, A., Leuenberger, M., Rinne, K. T., Treydte, K. S., Siegwolf, R. T. W. Influence of atmospheric circulation patterns on the oxygen isotope ratio of tree rings in the Alpine region // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. № 117. 2012. DOI:10.1029/2011JD016861.
- Saurer, M., Robertson, I., Siegwolf, R., Leuenberger, M. Oxygen isotope analysis of cellulose: an inter-laboratory comparison / M. Saurer // Anal. Chem. 1998. № 70. P. 2074–2080.
- 215. Saurer, M., Schweingruber, F., Vaganov, E. A., Schiyatov, S. G., Siegwolf, R. Spatial and temporal oxygen isotope trends at the northern tree-line in Eurasia / M. Saurer // Geophysical research letters. 2002. № 29.
- Saurer, M., Siegwolf, R. T. W. / M. Saurer // In: Stable isotopes as indicators of ecological change. T. E. Dawson, R.T.W. Siegwolf, Eds. Elsevier. – 2007. – P. 45-57.
- 217. Saurer, M., Siegwolf, R., Schweingruber, F. H. Carbon isotope discrimination indicates improving water-use efficiency of trees in northern Eurasia over the last 100 years / M. Saurer // Global Change Biology. 2004. № 10. P. 2109–2120.
- 218. Saurer, M., Spahni, R., Frank, D. C., Joos, F., Leuenberger, M., Loader, N. J., McCarroll, D., Gagen, M., Poulter, B., Siegwolf, R. T., Andreu-Hayles, L., Boettger, T., Dorado Linan, I., Fairchild, I. J., Friedrich, M., Gutierrez, E., Haupt, M., Hilasvuori, E., Heinrich, I., Helle, G., Grudd, H., Jalkanen, R., Levanic, T., Linderholm, H. W., Robertson, I., Sonninen, E., Treydte, K., Waterhouse, J. S., Woodley, E. J., Wynn, P. M., Young, G. H. Spatial variability and temporal trends in water-use efficiency of European forests / M. Saurer // Global Change Biology. 2014. № 20. P. 3700–3712.
- 219. Scheidegger, Y., Saurer, M., Bahn, M., Siegwolf, R. Linking stable oxygen and carbon isotopes with stomatal conductance and photosynthetic capacity: a conceptual model
 / Y. Scheidegger // Oecologia. 2000. № 125. P. 350–357. DOI: 10.1007/s004420000466.
- 220. Schneider, R., Schmitt, J., Köhler, P., Joos, F., and Fischer, H. A reconstruction of atmospheric carbon dioxide and its stable carbon isotopic composition from the penultimate

glacial maximum to the last glacial inception / R. Schneider // Climate of the Past. – 2013. – N_{2} 9. – P. 2507–2523. DOI:10.5194/cp-9-2507-2013.

- 221. Scholze, M., Kaplan, J. O., Knorr, W., Heimann, M. Climate and interannual variability of the atmosphere-biosphere ¹³CO₂ flux / M. Scholze // Geophysical Research Letters. 2003. № 30. DOI:10.1029/2002GL015631.
- Schweingruber, F. H. Tree rings and environment dendroecology. / F. H. Schweingruber. // Bern, Stuttgart, Vienna, Paul Haupt Publ. 1996. 609 p.
- 223. Seibt, U., Rajabi, A., Griffiths, H., Berry, J. A. Carbon isotopes and water use efficiency: sense and sensitivity / U. Seibt // Oecologia. 2008. № 155. P. 441–454.
- 224. Selegei, V., Dehandschutter, B., Klerkx, J., Vysotsky, E. The physical and geological environment of lake Teletskoye. Royal museum of central Africa, Tervuren, Belgium / V. Selegei // Ann. Sci. Geol. – 2001. – № 105. – P. 310.
- Shiyatov, S. G. Reconstruction of climate and the upper timberline dynamics since A.D. 745 by tree-ring data in the Polar Ural Mountains / S. G. Shiyatov // Intern. Conf. on Past, Present and Future Climate. Helsinki: Acad. Publ. 1995. № 6. P. 144-147.
- Sidorova, O. V., Saurer, M., Myglan, V. S., Eichler, A., Schwikowski, M., Kirdyanov, A. V., Bryukhanova, M. V., Gerasimova, O. V., Kalugin, I. A., Daryin, A. V., Siegwolf, R. T. W. A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai / O.V. Sidorova // Climate Dynamics. 2012. № 38. P. 175–188. DOI:10.1007/s00382-010-0989-6.
- Sidorova, O. V., Siegwolf, R. T. W., Saurer, M., Naurzbaev, M. M., and Vaganov, E.
 A. Isotopic composition (δ¹³C, δ¹⁸O) in wood and cellulose of Siberian larch trees for early Medieval and recent periods / O. V. Sidorova // Journal of Geophysical Research Biogeosciences. 2008. № 113. DOI.org/10.1029/2007JG000473.
- 228. Sidorova, O. V., Siegwolf, R. T. W., Saurer, M., Naurzbaev, M. M., Shaskin, A. V., Vaganov, E. A. Spatial patterns of climatic changes in the Eurasian north reflected in Siberian larch tree-ring parameters and stable isotopes / O. V. Sidorova // Global Change Biology. 2010. № 16. P. 1003–1018. DOI:10.1111/j.1365-2486.2009.02008.x.

- Sidorova, O.V., Naurzbaev, M., Vaganov, E.A. High resolution records of temperature change during the last millennia in high latitudes of Siberia / O. V. Sidorova // Int. Forest Rev. 2005. № (7) 5. P. 75-78.
- Sidorova, O. V., Siegwolf, R., Saurer, M., Shashkin, A. V., Knorre, A. A., Prokushkin, A. S., Vaganov, E. A., Kirdyanov, A. V. Do centennial tree-ring and stable isotope trends of *Larix gmelinii* (Rupr.) indicate increasing water shortage in the Siberian north? / O. V. Sidorova // Oecologia. 2009. № 161 (4). P. 825-835. DOI: 10.1007/s00442-009-1411-0.
- 231. Sigl, M., Winstrup, M., McConnell, J. R. et al. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2500 years / M. Sigl // Nature. 2015. 523. P 543-549. DOI:10.1038/nature14565.
- Simarski, L. T. Constantinople's volcanic twelfth. / L. T. Simarski // Aramoco world November-December, 1996. – P. 8-15.
- 233. Sitch, S. et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model / S. Sitich // Global Change Biology. 2003. № 9. P. 161-185.
- 234. Skomarkova, M. V., Vaganov, E. A., Mund, M., Knohl, A., Linke, P., Boerner, A., Schulze, E.-D. Inter-annual and seasonal variability of radial growth, wood density and carbon isotope ratios in tree rings of beech (*Fagus sylvatica*) growing in Germany and Italy /M. V. Skomarkova // Trees. 2006. № 20. (5). P. 571–586.
- 235. Spahni, R., Joos, F., Stocker, B. D., Steinacher, M., Yu, Z. C. Transient simulations of the carbon and nitrogen dynamics in northern peatlands: from the Last Glacial Maximum to the 21st century / R. Spahni // Clim Past. 2013. № 9. P. 1287-1308. DOI:10.5194/cp-9-1287-2013.
- 236. Srikanthan, R., McMahon, T. A. Stochastic generation of rainfall and evaporation data / R. Srikanthan // Aust. water resourse couns. teach. pap. 84. AGPS, Camberra, ACT, Australia. – 1985. – 301 pp.
- 237. Stenchikov, G., Hamilton, K., Stouffer, R. J., Robock, A., V. Ramaswamy, B. Santer, and H-F. Graf. Arctic Oscillation response to volcanic eruptions in the IPCC AR4 climate

models / G. Stenchikov // J. Geophys. Res. 2006. – P. 111. D07107. – DOI: 10.1029/2005JD006286.

- 238. Stenchikov, G., Robock, A., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M. D., Hamilton, K., Ramachandran, S. Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion / G. Stenchikov // J. Geophys. Res. – 2002. – № 107. – P. 4803, DOI: 10.1029/2002JD002090.
- 239. Sternberg, Ld. S., DeNiro, M. J. Biogeochemical implications of the isotopic equilibrium fractionation factor between the oxygen atoms of acetone and water / Ld. S. Sternberg // Geochimica Cosmochim Acta. 1983. № 47. P. 2271–2274.
- 240. Stirzaker, D. Elementary Probability density functions / D. Stirzaker // Cambridge.
 Sec. Ed. 2003. 538 p.
- Stitt, M., Krapp, A. The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background / M. Stitt // Plant, Cell & Environment. 1999. № 22. P. 583–621.
- Stocker, B. D., Roth, R., Joos, F., Spahni, R., Steinacher, M., Zaehle, S., Bouwman, L., Ri, X., Prentice, I. C. Multiple greenhouse-gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios /B. D. Stocker // Nature Climate Change. 2013. № 3. P. 666-672.
- Stoffel, M., Khodri, M., Corona, C., Guillet, S., Poulain, V., Bekki, S., Guiot, J., Luckman, B. H., Oppenheimer, C., Lebas, N., Beniston, M., Masson-Delmotte, V. Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1500 years / M. Stoffel // Nature Geoscience. 2015. № 8. P. 784 788.
- 244. Stothers R. Far reach of the tenth century Eldgja eruption, Iceland / R. Stothers // Climatic Change. 1998. № 39. P. 715-726.
- 245. Stothers R. Volcanic dry fogs, climate cooling and Plague pandemics in Europe and the Middle East / R. Stothers // Climate change. 1999. № 42. P. 713-723.
- 246. Stothers, R. Climatic and demographic consequences of the massive volcanic eruption of 1258 / R. Stothers // Climatic Change. 2000. № 45. P. 361-374.
- Stothers, R. The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath / R. Stothers //
 Science. 1984. № 224. P. 1191-1198.

- 248. Streit, K., Siegwolf, R. T. W., Hagedorn, F., Schaub, M., and Buchmann, N. Lack of photosynthetic or stomatal regulation after 9 years of elevated [CO₂] and 4 years of soil warming in two conifer species at the alpine tree line / K. Streit // Plant, Cell & Environment. 2014. № 37. P. 315–326. DOI:10.1111/pce.12197.
- 249. Stuiver, M., Reimer, P. J. Extended ¹⁴C data based and revised Calib. 3.0 ¹⁴C age calibration program / M. Stuiver // Radiocarbon. № 35. 1993. P. 215-230.
- Sugimoto, A., Yanagisawa, N., Fujita, N., Maximov, T. C. Importance of permafrost as a source of water for plants in east Siberian taiga / A. Sugimoto // Ecological Research. 2002. № 17 (4). P. 493-503.
- Suits, N. S., Denning, A. S., Berry, J. A., Still, C. J., Kaduk, J., Miller, J. B., Baker, I. T. Simulation of carbon isotope discrimination of the terrestrial biosphere / N. M. Suits // Global Biogeochemical Cycles. 2005. № 19. DOI :10.1029/2003GB002141.
- 252. Schuur, E. A. G., McGuire A. D., Schadel C., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J., Hugelius G., Koven C. D., Kuhry P., Lawrence D. M., Natali S. M., Olefeldt D., Romanovsky V. E., Schaefer K., Turetsky M. R., Treat C. C., Vonk J. E. Climate change and the permafrost carbon feedback / E. A. Schuur // Nature. – 2015. – № 520. – P. 171-179. DOI: 10.1038/nature14338.
- 253. Swethnam, T. W., Betancour, J. L. Mesoscale disturbance and ecological response to decadal climatic variability in the American Southwest / T. W. Swethnam // Journal of Climate. – 1998. – № 11. – P. 2138-3147.
- 254. Thompson L. G. Ice-core records with emphasis on the global record of the last 2000 years / L. G. Thompson // Global changes of the past (R. Bradley, ed.) UCAR/OIES, Boulder, Colorado. 1989. P. 201-224.
- 255. Treydte, K. S., Frank, D. C., Saurer, M., Helle, G., Schleser, G. H., Esper, J. Impact of climate and CO₂ on a millennium-long tree-ring carbon isotope record / K. S. Treydte // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009. № 73. P. 4635 4641. DOI: 10.1016/j.gca.2009.05.057.
- 256. Treydte, K. S., Schleser, G. H., Helle, G., Frank, D. C., Winiger, M., Haug, G. H., Esper, J. The twentieth century was the wettest period in northern Pakistan over the past

millennium / K. S. Treydte // Nature. – 2006. – 440. – P. 1179–1182. DOI:10.1038/nature04743.

- 257. Treydte, K., Frank, D., Esper, J., Andreu, L., Bednarz, Z., Berninger, F., Boettger, T., D'Alessandro, C. M., Etien, N., Filot, M., Grabner, M., Guillemin, M. T., Gutierrez, E., Haupt, M., Helle, G., Hilasvuori, E., Jungner, H., Kalela-Brundin, M., Krapiec, M., Leuenberger, M., Loader, N. J., Masson-Delmotte, V., Pazdur, A., Pawelczyk, S., Pierre, M., Planells, O., Pukiene, R., Reynolds-Henne, C. E., Rinne, K. T., Saracino, A., Saurer, M., Sonninen, E., Stievenard, M., Switsur, V. R., Szczepanek, M., Szychowska-Krapiec, E., Todaro, L., Waterhouse, J. S., Weigl, M., Schleser, G. H. Signal strength and climate calibration of a European tree-ring isotope network / K. Treydte // Geophysical Research Letters. 2007. 34. L24 302. DOI:10.1029/2007GL031106.
- 258. Trouet, V., Esper, J., Graham, N.E., Baker, A., Scourse, J.D., Frank, D.C. Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the Medieval climate anomaly /V. Trouet // Science. 2009. № 324. P. 78-80.
- 259. Vaganov, E. A., Hughes, M. K., Kirdyanov, A. V., Schweingruber, F., Silkin, P. P. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in Subarctic Eurasia / E. A. Vaganov // Nature. 1999. № 400. P. 149-151.
- 260. Vaganov, E. A., Hughes, M. K., Kirdyanov A. V., Schweingruber, F. H., Silkin, P. P. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes / E. A. Vaganov // Nature. 1998. № 391. P. 678-682.
- 261. Vaganov, E. A., Shizatov, S. G., and Mazepa, S. G. Dendroclimatological studies in Ural-Siberian Subarctic / E. A. Vaganov. // Nauka, Novosibirsk. – 1996.
- 262. Vaganov, E. A., Hughes, M. K., Shashkin, A. V. Growth dynamics of conifer tree rings: Images of past and future environments / E. A. Vaganov. // Springler. 2006. 353 p.
- 263. Vaganov, E. A., Naurzbaev, M. M., Schweingruber, F. H., Briffa, K. R. A 840-year tree-ring chronology for Taymir as an indicator of summer temperature changes / E. A. Vaganov // Dendrochronologia. 1996.
- 264. Vaganov, E. A., Schulze, E-D., Skomarkova, M. V., Knohl, A., Brand, W. A., Roscher, C. Intra-annual variability of anatomical structure and δ^{13} C values within tree rings

of spruce and pine in alpine, temperate and boreal Europe / E. A. Vaganov // 2009. – 161. – P. 729-745.

- 265. Verheyden, S., Baele, J.-M., Keppens, E., Genty, D., Cattani, O., Hai, C., Edwards, L., Hucai, Z., Van Strijdonck, M., Quinif, Y. The proserpine stalagmite (Han-sur-Lesse cave, Belgium). Preliminary environmental interpretation of the last 1000 years as recorded in a layered speleothem / S. Verheyden // Geol. Belg. 2006. № 9. P. 245–256.
- Voelker, S. L., Brooks, J. R., Meinzer, F. C., Anderson, R., Bader, M. K. F., Battipaglia, G., Becklin, K. M., Beerling, D., Bert, D., Betancourt, J. L., Dawson, T. E., Domec, J.-C., Guyette, R. P., Körner, C., Leavitt, S. W., Linder, S., Marshall, J. D., Mildner, M., Ogée, J., Panyushkina, I., Plumpton, H. J., Pregitzer, K. S., Saurer, M., Smith, A. R., Siegwolf, R. T. W., Stambaugh, M. C., Talhelm, A. F., Tardif, J. C., Van de Water, P. K., Ward, J. K., Wingate, L. A dynamic leaf gas-exchange strategy is conserved in woody plants under changing ambient CO₂: evidence from carbon isotope discrimination in paleo and CO₂ enrichment studies / S. L. Voelker // Global Change Biology. 2016. № 22. P. 889–902. DOI:10.1111/gcb.13102.
- 267. Walker, X. J., Mack, M. C., Johnstone, J. F. Stable carbon isotope analysis reveals widespread drought stress in boreal black spruce forests / X. J. Walker // Global Change Biology. – № 21. – P. 3102–3113. – DOI:10.1111/gcb.12893.
- 268. Wang, H., Prentice, I. C., Cornwell, W., Keenan, T., Davis, T., Wright, I., Evans, B., and Peng, C. A universal model for carbon dioxide uptake by plants, bioRxiv. / H. Wang // 2016. – DOI:10.1101/040246.
- Wania, R., Ross, I., Prentice, I. C. Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: 1. Evaluation and sensitivity of physical land surface processes / R. Wania // Global Biogeochem. Cyc. 2009. № 23. DOI:10.1029/2008gb003412.
- Wanner, H., W., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T. J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J. O., Küttel, M., Müller, S. A., Prentice, C., Solomina, O., Stocker, T. F., Tarasov, P. E., Wagner, M., Widmannm, M. Mid- to Late Holocene climate change: an overview / H. Wanner // Quaternary Science Reviews. 2008. № 27. P. 1791–1828.

- Wegmann, M., Brönnimann, S., Bhend, J., Franke, J., Folini, D., Wild, M., Luterbacher, J. Volcanic Influence on European summer precipitation through monsoons: Possible cause for "Years without summer" / M. Wegmann // J. Clim. Dyn. 2014. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00524.1.
- Wigley, W., Briffa, K. R., Jones, P. D. On the average value of correlated time series with applications in dedroclimatology and hydrometerorology / W. Wigley // J. Clim. Appl. Meteorology. 1994. № 23. P. 201–213.
- 273. Wilmking, M., D'Arrigo, R., Jacoby, G. C., Juday, G. P. Increased temperature sensitivity and divergent growth trends in circumpolar boreal forests / M. Wilmking // Geophysical Research Let. – 2005. – DOI. 10.1029/2005GL023331.
- Woodborne, S., Hall, G., Robertson, I., Patrut, A., Rouault, M., Loader, N. J., Hofmeyr, M. A 1000-Year Carbon Isotope Rainfall Proxy Record from South African Baobab Trees (*Adansonia digitate* L.) / S. Woodborne // PLoS ONE. 2015. № 10. DOI:10.1371/journal.pone.0124202.
- 275. Xu, G., Liu, X., Wu, G., Zhang, X. Tree ring O-18's indication of a shift to a wetter climate since the 1880s in the western Tianshan Mountains of northwestern China / G. Xu // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2015. № 120 (13).
- 276. Yakir, D. L., Sternberg, L. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange
 /D. L. Yakir // Oecologia. 2000. № 123. P. 297-311.
- Young, G. H. F., McCarroll, D., Loader, N. J., Gagen, M. H., Kirchhefer, A. J., Demmler, J. C. Changes in atmospheric circulation and the Arctic Oscillation preserved within a millennial length reconstruction of summer cloud cover from northern Fennoscandia / G. H. F. Young // Climate Dynamics. 2012. № 39. P. 495–507. DOI: 10.1007/s00382-011-1246-3.
- Young, G., McCarroll, D., Loader, N. J., Gagen, M. H., Kirchhefer, A. J., Demmler, J. C. Changes in atmospheric circulation and the Arctic Oscillation preserved within a millennial length reconstruction of summer cloud cover from northern Fennoscandia / G. Young // Climate Dynamics. 2012. № 39. P. 495–507.
- 279. Zetterberg, P., Eronen, M., Briffa, K. R. Evidence on climatic variability and prehistoric human activities between 165 B. C. and 1400 A. D. derived from subfossil Scots

pine (*Pinus sylvestrius*) found in a lake in Utsjoki, northern Finland / P. Zetterberg // Bulletin of the Geological society of Finland. – 1994. – 66. – P. 107-124.

- Zielinski, G. A. Stratospheric loading and optical depth estimates of explosive volcanism over the last 2100 years derived from the Greenland ice sheet project 2 ice core. / G. A. Zielinski // J. Geophys. Res. 1995. № 100. P. 20937 20955.
- Zielinski, G. A. Use of paleo-records in determining variability within the volcanismclimate system / G. A. Zielinski // Quaternary Science Reviews. – 2000. – № 19. – P. 417-438.
- 282. Zielinski, G. A., Germani, M., Larsen, G., Baillie, M., Whitlow, S., Twickler, M., Taylor, K. Evidence of the Eldja (Iceland) eruption in the GISP2 Greenland ice core: Relationship to eruption processes and climatic conditions in the tenth century / G. A. Zielinski // The Holocene. 1995. № 5. P. 129-140.
- Zielinski, G. A., Mayewski, P. A., Meeker, L. D., Whitlow, S., Twickler, M. S., Morrison, M., Meese, D., Alley, R. B., Gow, A. J. Record of volcanism since 7000 B. C. from the GISP 2 Greenland ice core and implications for the volcano-climatic system / G. A. Zielinski // Science. 1994. № 264. P. 948 -952.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 3. 1. Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное для всего периода с 516 г. по 2004 г. н. э. для хронологии, полученной по δ¹³С в целлюлозе годичных колец лиственниц, произрастающих на северо-востоке Якутии.

Номер												
строки	Год	≤+1σ	Год	<u>≤</u> +2σ	Год	<u>≤</u> +3σ	Год	<u>≤</u> -1σ	Год	<u>≤-2σ</u>	Год	≤-3σ Год
1	520	1,28	529	1,98	814	3,37	536	-1,66	1206	-2,18	1122	-3,85
2	525	1,38	551	2,61	828	3,33	581	-1,02	1216	-2,74	1538	-3,42
3	527	1,45	557	2,57	1036	3,51	588	-1,06	1228	-2,71	1540	-3,19
4	528	1,16	562	2,43			1083	-1,35	1238	-2,15		
5	530	1,48	810	2,88			1084	-1,47	1299	-2,87		
6	531	1,34	812	1,95			1085	-1,35	1300	-2,74		
7	532	1,15	815	2,30			1086	-1,47	1317	-2,03		
8	534	1,31	827	2,70			1088	-1,21	1331	-2,31		
9	535	1,89	829	2,50			1100	-1,76	1362	-2,17		
10	542	1,82	838	2,04			1102	-1,05	1370	-2,55		
11	547	1,25	840	2,06			1106	-1,19	1381	-2,49		
12	550	1,43	841	2,32			1128	-1,58	1394	-2,86		
13	552	1,49	842	2,37			1129	-1,15	1414	-2,03		
14	553	1,67	893	2,29			1137	-1,32	1420	-2,05		
15	554	1,82	897	2,06			1145	-1,39	1434	-2,25		
16	555	1,86	898	2,47			1149	-1,11	1447	-2,04		
17	556	1,35	994	2,00			1151	-1,30	1451	-2,30		
18	558	1,92	1037	2,69			1152	-1,14	1452	-2,50		
19	559	1,01	1038	2,05			1166	-1,06	1453	-2,75		
20	560	1,07	1060	2,11			1172	-1,38	1465	-2,60		
21	563	1,46	1061	2,38			1173	-1,09	1467	-2,38		
22	564	1,51	1273	2,03			1174	-1,25	1471	-2,28		
23	573	1,36	1625	2,01			1176	-1,01	1484	-2,28		
24	575	1,07	1626	2,19			1179	-1,09	1489	-2,62		
25	599	1,00	1652	2,07			1188	-1,10	1492	-2,45		
26	602	1,24	1673	2,17			1192	-1,11	1520	-2,15		
27	603	1,32	1674	2,32			1199	-1,05	1536	-2,13		

28	624	1,06	1960	2,88		1200	-1,17	1539	-2,38	
29	677	1,45	1971	2,24		1201	-1,48	1550	-2,06	
30	695	1,15	1983	2,01		1202	-1,47	1581	-2,61	
31	800	1,20	1991	2,51		1204	-1,34	1763	-2,28	
32	804	1,41	2001	2,08		1207	-1,53	1795	-2,17	
33	805	1,05	2003	2,20		1208	-1,70	1823	-2,08	
34	806	1,77				1209	-1,23			
35	809	1,86				1211	-1,22			
36	811	1,17				1213	-1,57			
37	813	1,64				1215	-1,49			
38	816	1,42				1221	-1,48			
39	820	1,46				1229	-1,46			
40	821	1,54				1231	-1,54			
41	825	1,10				1233	-1,19			
42	826	1,68				1235	-1,20			
43	830	1,76				1236	-1,67			
44	831	1,62				1237	-1,49			
45	832	1,68				1240	-1,31			
46	833	1,85				1288	-1,62			
47	834	1,71				1289	-1,08			
48	835	1,17				1293	-1,07			
49	837	1,59				1301	-1,66			
50	839	1,64				1302	-1,06			
51	843	1,53				1304	-1,59			
52	844	1,53				1307	-1,22			
53	846	1,15				1308	-1,06			
54	847	1,86				1309	-1,35			
55	848	1,41				1314	-1,75			
56	849	1,29				1315	-1,03			
57	851	1,55				1323	-1,93			
58	863	1,68				1329	-1,27			
59	871	1,36				1335	-1,36			
60	873	1,32				1343	-1,29			
61	877	1,15				1364	-1,50			

62	889	1,38		1365	-1,93		
63	890	1,57		1368	-1,20		
64	891	1,75		1371	-1,40		
65	892	1,91		1373	-1,22		
66	894	1,08		1375	-1,02		
67	896	1,36		1376	-1,86		
68	899	1,84		1377	-1,46		
69	901	1,03		1379	-1,26		
70	902	1,49		1380	-1,09		
71	905	1,20		1383	-1,77		
72	906	1,13		1388	-1,41		
73	911	1,24		1393	-1,97		
74	913	1,29		1395	-1,83		
75	915	1,12		1399	-1,33		
76	921	1,20		1400	-1,44		
77	929	1,12		1401	-1,17		
78	939	1,19		1402	-1,57		
79	940	1,06		1403	-1,57		
80	942	1,83		1406	-1,63		
81	943	1,32		1408	-1,13		
82	944	1,07		1410	-1,10		
83	946	1,06		1411	-1,81		
84	947	1,17		1413	-1,81		
85	955	1,67		1415	-1,24		
86	956	1,66		1421	-1,37		
87	960	1,07		1425	-1,30		
88	970	1,02		1431	-1,73		
89	971	1,44		1436	-1,88		
90	992	1,32		1438	-1,28		
91	993	1,22		1439	-1,93		
92	1000	1,58		1448	-1,29		
93	1001	1,13		1449	-1,88		
94	1002	1,08		1450	-1,04		
95	1005	1,91		1454	-1,30		

96	1006	1,26			1456	-1,31		
97	1007	1,88			1460	-1,51		
98	1008	1,52			1461	-1,66		
99	1009	1,53			1462	-1,90		
100	1012	1,07			1463	-1,25		
101	1014	1,69			1464	-1,20		
102	1015	1,24			1466	-1,81		
103	1016	1,09			1470	-1,85		
104	1028	1,15			1472	-1,11		
105	1029	1,39			1474	-1,63		
106	1030	1,38			1475	-1,29		
107	1031	1,72			1480	-1,77		
108	1032	1,58			1481	-1,10		
109	1035	1,10			1483	-1,52		
110	1039	1,24			1490	-1,04		
111	1040	1,23			1491	-1,42		
112	1041	1,30			1494	-1,80		
113	1042	1,33			1495	-1,65		
114	1044	1,37			1496	-1,03		
115	1046	1,05			1510	-1,58		
116	1050	1,18			1511	-1,51		
117	1052	1,14			1529	-1,37		
118	1053	1,33			1530	-1,68		
119	1054	1,10			1531	-1,67		
120	1055	1,55			1532	-1,06		
121	1056	1,80			1533	-1,42		
122	1057	1,94			1534	-1,00		
123	1058	1,77			1535	-1,19		
124	1059	1,66			1537	-1,70		
125	1068	1,39			1542	-1,49		
126	1069	1,17			1548	-1,44		
127	1070	1,57			1558	-1,07		
128	1071	1,25			1559	-1,03		
129	1073	1,06			1560	-1,17		

130	1074	1,19			1561	-1,39		
131	1076	1,31			1566	-1,19		
132	1077	1,10			1567	-1,59		
133	1113	1,33			1569	-1,60		
134	1119	1,02			1570	-1,24		
135	1141	1,29			1574	-1,32		
136	1161	1,47			1576	-1,74		
137	1268	1,34			1577	-1,40		
138	1269	1,05			1578	-1,39		
139	1270	1,41			1584	-1,00		
140	1271	1,42			1585	-1,36		
141	1272	1,80			1588	-1,58		
142	1274	1,71			1590	-1,75		
143	1277	1,56			1611	-1,06		
144	1320	1,51			1678	-1,31		
145	1339	1,32			1691	-1,24		
146	1389	1,36			1712	-1,19		
147	1427	1,31			1713	-1,53		
148	1458	1,79			1714	-1,18		
149	1587	1,21			1720	-1,11		
150	1600	1,02			1731	-1,05		
151	1627	1,48			1748	-1,51		
152	1628	1,26			1751	-1,03		
153	1632	1,25			1759	-1,01		
154	1633	1,20			1760	-1,37		
155	1639	1,93			1761	-1,10		
156	1640	1,36			1762	-1,41		
157	1647	1,14			1764	-1,89		
158	1648	1,43			1765	-1,47		
159	1649	1,25			1780	-1,00		
160	1653	1,19			1791	-1,36		
161	1654	1,51			1796	-1,29		
162	1656	1,18			1797	-1,33		
163	1659	1,45			1798	-1,12		

164	1661	1,48			1806	-1,14		
165	1662	1,50			1812	-1,21		
166	1663	1,54			1814	-1,21		
167	1664	1,85			1815	-1,04		
168	1666	1,02			1821	-1,41		
169	1667	1,26			1822	-1,98		
170	1671	1,11			1824	-1,32		
171	1672	1,80			1825	-1,45		
172	1682	1,02			1826	-1,19		
173	1832	1,16			1827	-1,13		
174	1880	1,20			1834	-1,30		
175	1881	1,26			1845	-1,47		
176	1882	1,34			1851	-1,37		
177	1894	1,26			1859	-1,61		
178	1895	1,36			1860	-1,39		
179	1896	1,19			1863	-1,37		
180	1897	1,42			1864	-1,43		
181	1898	1,60			1867	-1,33		
182	1899	1,07			1868	-1,19		
183	1908	1,23			1869	-1,55		
184	1911	1,15			1872	-1,06		
185	1912	1,38			1873	-1,29		
186	1913	1,26			1874	-1,05		
187	1914	1,13			1876	-1,00		
188	1932	1,43			1877	-1,11		
189	1933	1,16						
190	1934	1,59						
191	1935	1,69						
192	1936	1,99						
193	1937	1,67						
194	1938	1,08						
195	1941	1,21						
196	1955	1,04						
197	1956	1,47						

198	1957	1,43					
199	1958	1,70					
200	1961	1,28					
201	1962	1,04					
202	1963	1,31					
203	1965	1,87					
204	1966	1,19					
205	1968	1,79					
206	1969	1,48					
207	1972	1,66					
208	1973	1,83					
209	1974	1,07					
210	1982	1,42					
211	1985	1,05					
212	1987	1,69					
213	1992	1,18					
214	1994	1,02					
215	2002	1,58					
216	2004	1,25					

Номер												
строки	Год	<u>≤</u> +1σ	Год	<u>≤</u> +2σ	Год	<u>≤</u> +3σ	Год	<u>≤</u> -1σ	Год	≤-2 σ	Год	<u>≤</u> -3σ
1	556	1,00	823	2,00	719	3,03	536	-1,70	817	-2,22	2 1258	-3,67
2	1161	1,00	810	2,35	1094	3,90	538	-1,18	850	-2,28	8 1259	-5,40
3	1406	1,00	827	2,37	1095	3,20	542	-1,33	859	-2,01	1263	-5,10
4	793	1,00	828	2,49	1458	3,35	603	-1,03	871	-2,17	7 1269	-3,09
5	1669	1,00	1089	2,00	1500	3,69	611	-1,56	909	-2,05	5	
6	1402	1,01	1091	2,33	1535	3,51	612	-1,91	917	-2,19)	
7	1654	1,01	1093	2,35	1587	3,38	613	-1,71	920	-2,44	ł	
8	1779	1,03	1096	2,50	1621	3,15	622	-1,56	923	-2,58	3	
9	692	1,03	1097	2,40			627	-1,03	924	-2,11		
10	1320	1,04	1098	2,29			733	-1,02	1022	-2,28	3	
11	673	1,04	1100	2,17			734	-1,04	1023	-2,09)	
12	1636	1,04	1101	2,61			781	-1,28	1043	-2,49)	
13	643	1,04	1102	2,20			802	-1,38	1044	-2,23	3	
14	1575	1,04	1457	2,69			803	-1,36	1069	-2,12	2	
15	1444	1,04	1468	2,15			830	-1,57	1070	-2,50)	
16	1997	1,05	1469	2,21			836	-1,65	1201	-2,07	7	
17	674	1,06	1473	2,42			852	-1,23	1242	-2,39)	
18	670	1,06	1474	2,52			853	-1,27	1243	-2,58	3	
19	1679	1,06	1475	2,98			855	-1,23	1244	-2,30)	
20	1771	1,06	1476	2,57			856	-1,44	1247	-2,14	ł	
21	1539	1,06	1497	2,10			857	-1,50	1248	-2,24	ł	
22	1545	1,06	1499	2,27			858	-1,02	1249	-2,38	3	
23	1730	1,07	1501	2,14			860	-1,07	1253	-2,79)	
24	1086	1,07	1504	2,05			864	-1,06	1256	-2,84	t I	
25	1522	1,08	1507	2,06			869	-1,02	1264	-2,47	7	
26	1938	1,09	1533	2,79			870	-1,35	1265	-2,50)	
27	1113	1,10	1552	2,36			875	-1,26	1266	-2,06	5	
28	1452	1,10	1565	2,07			882	-1,23	1277	-2,61		
29	1456	1,11	1624	2,83			894	-1,92	1283	-2,03	3	

Таблица 3. 2. Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное для периода с 516 г. по 2004 г. н. э. для хронологии, полученной по δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец лиственниц, произрастающих на северо-востоке Якутии.

30	1494	1,11	1663	2,30		895	-1,75	1792	-2,38	
31	1470	1,11	1664	2,80		908	-1,56	1806	-2,08	
32	1116	1,12	1667	2,12		910	-1,21	1823	-2,85	
33	1683	1,12	1668	2,15		912	-1,14	1824	-2,21	
34	1772	1,12	1991	2,00		913	-1,91	1834	-2,65	
35	1518	1,13				914	-1,08	1864	-2,44	
36	971	1,13				916	-1,22	1881	-2,28	
37	1638	1,13				918	-1,35			
38	576	1,13				922	-1,73			
39	1081	1,14				926	-1,35			
40	1450	1,14				927	-1,35			
41	1451	1,15				931	-1,75			
42	811	1,15				934	-1,43			
43	1159	1,15				940	-1,09			
44	1641	1,16				960	-1,00			
45	1485	1,16				966	-1,04			
46	678	1,16				973	-1,14			
47	896	1,17				977	-1,09			
48	1085	1,17				1003	-1,19			
49	1107	1,17				1004	-1,39			
50	1461	1,17				1013	-1,00			
51	1659	1,18				1020	-1,18			
52	1495	1,18				1021	-1,25			
53	1546	1,18				1024	-1,01			
54	1934	1,19				1025	-1,08			
55	1403	1,19				1026	-1,14			
56	1455	1,19				1028	-1,73			
57	1674	1,19				1030	-1,24			
58	1322	1,19				1035	-1,55			
59	1994	1,20				1036	-1,13			
60	1651	1,22				1038	-1,84			
61	691	1,24				1042	-1,11			
62	567	1,24				1048	-1,40			
63	1695	1,24				1049	-1,20			

64	1617	1,24			1050	-1,34		
65	1141	1,27			1051	-1,17		
66	1639	1,27			1052	-1,58		
67	804	1,28			1054	-1,07		
68	1936	1,28			1059	-1,22		
69	1188	1,29			1060	-1,29		
70	1652	1,30			1061	-1,41		
71	1566	1,30			1062	-1,03		
72	1339	1,30			1063	-1,74		
73	1538	1,31			1065	-1,41		
74	988	1,31			1066	-1,52		
75	1498	1,32			1067	-1,40		
76	1665	1,33			1068	-1,13		
77	1130	1,33			1071	-1,95		
78	2001	1,33			1072	-1,40		
79	1862	1,33	 		1073	-1,09		
80	1293	1,33			1124	-1,37		
81	1632	1,33	 		1150	-1,95		
82	1083	1,34	 		1200	-1,30		
83	807	1,35	 		1202	-1,47		
84	1623	1,35	 		1203	-1,93		
85	1578	1,35	 		1211	-1,30		
86	1666	1,35	 		1233	-1,26		
87	568	1,35	 		1241	-1,89		
88	1084	1,35	 		1245	-1,47		
89	555	1,36	 		1246	-1,78		
90	695	1,36			1250	-1,89		
91	1350	1,36			1251	-1,43		
92	1965	1,36			1252	-1,68		
93	1536	1,36			1254	-1,49		
94	1407	1,37			1255	-1,56		
95	1894	1,38			1257	-1,18		
96	1181	1,40			1260	-1,62		
97	694	1,40			1261	-1,18		

98	672	1,40		126	2 -1	,90		
99	1849	1,41		126	7 -1	,20		
100	1487	1,41		127	8 -1	,76		
101	1549	1,41		127	9 -1	,95		
102	800	1,42		128	1 -1	,54		
103	1180	1,42		128	2 -1	,98		
104	1478	1,44		128	4 -1	,19		
105	585	1,44		130	1 -1	,10		
106	1496	1,45		133	0 -1	,91		
107	699	1,46		136	7 -1	,51		
108	1527	1,46		159	1 -1	,01		
109	1170	1,47		159	4 -1	,18		
110	1528	1,47		159	8 -1	,07		
111	838	1,47		160	5 -1	,47		
112	1572	1,47		167	8 -1	,15		
113	1090	1,47		171	2 -1	,02		
114	1115	1,48		171	3 -1	,35		
115	562	1,49		171	4 -1	,33		
116	825	1,49		171	8 -1	,07		
117	892	1,49		171	9 -1	,84		
118	1529	1,50		175	1 -1	,10		
119	1099	1,50		176	2 -1	,64		
120	1311	1,51		176	3 -1	,55		
121	1585	1,51		176	4 -1	,62		
122	1080	1,52		176	5 -1	,16		
123	1088	1,52		179	1 -1	,01		
124	1505	1,53		179	3 -1	,75		
125	1140	1,53		179	4 -1	,88		
126	1662	1,55		179	5 -1	,74		
127	1503	1,56		181	2 -1	,92		
128	1340	1,57		181	3 -1	,96		
129	1682	1,57		181	4 -1	,00		
130	1532	1,58		181	5 -1	,28		
131	1445	1,58		181	6 -1	,04		

132	1861	1,58			1822	-1,92		
133	1472	1,59			1825	-1,73		
134	1582	1,63			1831	-1,31		
135	1078	1,63			1833	-1,62		
136	1774	1,63			1842	-1,61		
137	1520	1,64			1851	-1,25		
138	566	1,66			1880	-1,18		
139	1459	1,67			1883	-1,42		
140	579	1,68			1884	-1,22		
141	1640	1,68			1885	-1,42		
142	1119	1,70			1886	-1,96		
143	1858	1,70			1887	-1,25		
144	1562	1,72			1910	-1,38		
145	1521	1,72			1916	-1,14		
146	1092	1,73			1923	-1,43		
147	1512	1,75			1924	-1,39		
148	575	1,75			1925	-1,53		
149	1493	1,76			1926	-1,13		
150	1650	1,77			1950	-1,09		
151	569	1,78			1951	-1,08		
152	955	1,78			1957	-1,18		
153	1675	1,79			1959	-1,39		
154	1620	1,81			1973	-1,08		
155	1534	1,81			1984	-1,21		
156	1701	1,83						
157	705	1,85						
158	1559	1,86						
159	812	1,87						
160	1132	1,89						
161	1467	1,91						
162	1348	1,93						
163	1157	1,93						
164	1112	1,95						
165	1502	1,95						

166	1324	1,97					

Номер												
строки	Год	≤+ 1 σ	Год	≤+2 σ	Год	≤+3 σ	Год	≤-1σ	Год	<u>≤</u> -2σ	Год	<u>≤</u> -3σ
1	1982	1,9	1561	2,9	1979	3,9	1532	-1,0	1535	-1,9	1194	-3,0
2	1965	1,9	1329	2,9	1980	3,9	623	-1,0	536	-2,0		
3	1372	1,9	1419	2,8	2009	3,8	1485	-1,0	900	-2,0		
4	1950	1,9	1444	2,8	1717	3,7	1226	-1,0	1318	-2,0		
5	1914	1,9	1325	2,8	1732	3,5	628	-1,0	946	-2,0		
6	1946	1,9	1985	2,8	2008	3,4	1243	-1,0	1547	-2,0		
7	953	1,9	1910	2,8	1957	3,1	1650	-1,0	1295	-2,0		
8	1639	1,9	1981	2,8	1368	3,0	892	-1,0	1531	-2,0		
9	1736	1,9	1947	2,6	1955	3,0	1449	-1,0	1558	-2,0		
10	1241	1,9	1967	2,5			666	-1,0	1259	-2,0		
11	1966	1,9	1984	2,5			1140	-1,0	1286	-2,1		
12	1973	1,9	2001	2,5			1338	-1,0	1505	-2,1		
13	1998	1,9	1420	2,4			1506	-1,0	1106	-2,1		
14	1999	1,8	1917	2,4			1810	-1,0	544	-2,1		
15	1919	1,8	2000	2,4			1460	-1,0	550	-2,1		
16	1640	1,8	1455	2,4			1185	-1,0	1559	-2,2		
17	1390	1,8	1975	2,4			1469	-1,0	1104	-2,2		
18	1959	1,8	1924	2,3			571	-1,0	1213	-2,2		
19	1926	1,8	1451	2,3			904	-1,0	1118	-2,2		
20	1977	1,8	1948	2,3			1138	-1,0	537	-2,2		
21	1986	1,8	1923	2,3			1525	-1,0	1215	-2,3		
22	1916	1,8	1956	2,3			1136	-1,0	1501	-2,3		
23	1960	1,7	1969	2,2			519	-1,0	1105	-2,3		
24	1797	1,7	832	2,2			633	-1,0	1302	-2,3		
25	1434	1,7	1925	2,2			606	-1,0	1331	-2,4		
26	1896	1,7	1538	2,2			1766	-1,0	538	-2,4		
27	1918	1,7	1733	2,2			1103	-1,0	1124	-2,4		
28	1972	1,7	1448	2,2			1030	-1,0	1565	-2,4		
29	1961	1,7	1968	2,1			1767	-1,0	1108	-2,4		

Таблица 4. 1. Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное для периода с 516 г. по 2009 г. н. э. для хронологии, полученной по δ¹³С в целлюлозе годичных колец лиственниц, произрастающих на востоке Таймыра.

·										-
30	1860	1,7	1958	2,1		1725	-1,0	1113	-2,7	
31	1945	1,7	1713	2,1		1205	-1,0	1315	-2,7	
32	1964	1,6	1383	2,1		1648	-1,0	1290	-2,7	
33	2002	1,6	1337	2,1		599	-1,0	1291	-2,8	
34	1750	1,6	1462	2,1		600	-1,0			
35	1976	1,6	2006	2,1		1499	-1,0			
36	1978	1,6	1345	2,1		1528	-1,0			
37	999	1,6	2007	2,1		912	-1,0			
38	579	1,6	1466	2,1		907	-1,0			
39	1922	1,6	1949	2,0		1726	-1,0			
40	1971	1,6	1596	2,0		1570	-1,0			
41	1728	1,6	927	2,0		679	-1,0			
42	1859	1,5	1208	2,0		1107	-1,0			
43	1557	1,5	1050	2,0		1610	-1,0			
44	1997	1,5	1752	2,0		1438	-1,1			
45	1493	1,5	945	2,0		1246	-1,1			
46	1537	1,5	969	2,0		1195	-1,1			
47	1934	1,5	1059	2,0		1714	-1,1			
48	1909	1,5	1379	2,0		1468	-1,1			
49	1953	1,5	1911	2,0		1274	-1,1			
50	1724	1,5	1237	2,0		1122	-1,1			
51	1183	1,5				1130	-1,1			
52	1921	1,5				1539	-1,1			
53	1366	1,5				1653	-1,1			
54	1416	1,5				964	-1,1			
55	1176	1,5				1095	-1,1			
56	1915	1,5				1651	-1,1			
57	1504	1,4				1238	-1,1			
58	1878	1,4				613	-1,1			
59	1991	1,4			1	668	-1,1			
60	1899	1,4			1	1435	-1,1			
61	931	1,4			1	1163	-1,1			
62	1579	1,4				1783	-1,1			
63	1336	1,4			 1	815	-1,1			
к		,					,			1

64	1169	1,4			903	-1,1		
65	1394	1,4			1096	-1,1		
66	1600	1,4			1594	-1,1		
67	1204	1,4			1322	-1,1		
68	1421	1,4			951	-1,1		
69	1941	1,4			595	-1,1		
70	1970	1,4			925	-1,1		
71	1554	1,4			1126	-1,1		
72	560	1,4			933	-1,1		
73	1352	1,4			950	-1,1		
74	1880	1,3			1482	-1,1		
75	1897	1,3			804	-1,1		
76	860	1,3			1502	-1,1		
77	1882	1,3			1167	-1,2		
78	985	1,3			1280	-1,2		
79	1548	1,3			1350	-1,2		
80	1555	1,3			1608	-1,2		
81	1413	1,3			908	-1,2		
82	1691	1,3			918	-1,2		
83	1530	1,3			1142	-1,2		
84	1933	1,3			1303	-1,2		
85	1165	1,3			1051	-1,2		
86	924	1,3			1251	-1,2		
87	1996	1,3			609	-1,2		
88	1951	1,3			848	-1,2		
89	1862	1,3			1473	-1,2		
90	984	1,3			612	-1,2		
91	986	1,3			1507	-1,2		
92	1021	1,3			803	-1,2		
93	1749	1,2			1774	-1,2		
94	1901	1,2			1281	-1,2		
95	1932	1,2			1031	-1,2		
96	1700	1,2			1652	-1,2		
97	1872	1,2			621	-1,2		

$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$								
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	98	1212	1,2		809	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	99	1432	1,2		1524	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	100	1983	1,2		1649	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	101	1341	1,2		1062	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	102	1589	1,2		1475	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	103	1930	1,2		1721	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	104	1943	1,2		899	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	105	1463	1,2		1484	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	106	1386	1,2		1718	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	107	1409	1,2		1217	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	108	1710	1,2		1309	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	109	1367	1,2		1784	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	110	1018	1,2		1705	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	111	1894	1,2		611	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	112	1879	1,2		1590	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	113	1906	1,2		1616	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	114	1871	1,2		1234	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	115	745	1,2		1112	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	116	1858	1,1		1196	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	117	1247	1,1		898	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	118	1992	1,1		814	-1,3		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	119	1962	1,1		1319	-1,3		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	120	1898	1,1		1495	-1,4		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	121	1418	1,1		1266	-1,4		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	122	1686	1,1		1233	-1,4		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	123	1857	1,1		1004	-1,4		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	124	940	1,1		1576	-1,4		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	125	1912	1,1		934	-1,4		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	126	1735	1,1		1174	-1,4		
128 1568 1,1 959 -1,4 129 1935 1,1 1380 -1,4 130 1689 1,1 1216 -1,4 131 1256 1,1 1566 -1,4	127	1875	1,1		1260	-1,4		
129 1935 1,1 1380 -1,4 1 130 1689 1,1 1216 -1,4 1 131 1256 1,1 1566 -1,4 1	128	1568	1,1		959	-1,4		
130 1689 1,1 1216 -1,4 131 1256 1,1 1566 -1,4	129	1935	1,1		1380	-1,4		
131 1256 1,1 1566 -1,4	130	1689	1,1		1216	-1,4		
	131	1256	1,1		1566	-1,4		

$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$										
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	132	1346	1,1			1333	-1,4			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	133	789	1,1			1214	-1,4			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	134	1534	1,1			1604	-1,4			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	135	1731	1,1			1376	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	136	1620	1,1			1131	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	137	1693	1,1			818	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	138	1895	1,1			1373	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	139	1683	1,0			1529	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	140	1861	1,0			947	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	141	1397	1,0			1320	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	142	1974	1,0			1647	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	143	1954	1,0			1170	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	144	1190	1,0			943	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	145	785	1,0			1299	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	146	1041	1,0			1593	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	147	1000	1,0			1114	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	148	1045	1,0			1248	-1,5			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	149	1821	1,0			1768	-1,6			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	150	1819	1,0			543	-1,6			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	151	1993	1,0			1292	-1,6			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	152	1414	1,0			881	-1,6			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	153	1682	1,0			526	-1,6			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	154	1944	1,0			1330	-1,6			
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	155	1523	1,0			957	-1,6			
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	156	2005	1,0			902	-1,6			
158 1405 1,0 545 -1,6 160 159 1873 1,0 917 -1,6 160 160 1663 1,0 1029 -1,6 160 161 1348 1,0 1278 -1,7 160	157	1905	1,0			551	-1,6			
159 1873 1,0 917 -1,6 160 1663 1,0 1029 -1,6 161 1348 1,0 1278 -1,7	158	1405	1,0			545	-1,6			
160 1663 1,0 1029 -1,6 161 1348 1,0 1278 -1,7	159	1873	1,0			917	-1,6			
161 1348 1,0 1278 -1,7	160	1663	1,0			1029	-1,6			
	161	1348	1,0			1278	-1,7			
162 1817 1,0 548 -1,7	162	1817	1,0			548	-1,7			
163 1454 1,0 1569 -1,7	163	1454	1,0			1569	-1,7			
164 901 -1,7	164					901	-1,7			
165 552 -1,7	165					552	-1,7			

166	1311 -1,7
167	810 -1,7
168	1133 -1,7
169	541 -1,7
170	956 -1,7
171	1494 -1,7
172	1363 -1,7
173	1173 -1,7
174	1335 -1,7
175	1452 -1,7
176	1491 -1,7
177	1134 -1,7
178	1265 -1,7
179	1166 -1,7
180	916 -1,8
181	1761 -1,8
182	1509 -1,8
183	1498 -1,8
184	1264 -1,8
185	1480 -1,8
186	1490 -1,8
187	1277 -1,8
188	542 -1,8
189	1562 -1,8
190	539 -1,8
191	1573 -1,8
192	1477 -1,8
193	817 -1,8
194	1268 -1,8
195	958 -1,9
196	547 -1,9
197	1306 -1,9
198	1563 -1,9
199	540 -1,9

0	5	2
2	Э	L

200		129	8 -1,9									
201		110	9 -1,9									
202		111	0 -1,9									
Номер												
--------	------	--------------	------	--------------	-----	--------------	------	--------------	------	--------------	------	--------------
строки	Год	<u>≤</u> +1σ	Год	≤+2 σ	Год	<u>≤</u> +3σ	Год	<u>≤</u> -1σ	Год	<u>≤</u> -2σ	Год	<u>≤</u> -3σ
1	757	1,0	764	2,0	832	3,0	1077	-1,9	1834	-2,9	1822	-3,3
2	717	1,0	586	2,0	943	3,1	1056	-1,9	1835	-2,9		
3	790	1,0	1206	2,0	923	4,2	1051	-1,9	1815	-2,8		
4	1700	1,0	765	2,1			1219	-1,9	1825	-2,8		
5	1062	1,0	756	2,1			996	-1,9	1069	-2,8		
6	592	1,0	563	2,1			1608	-1,9	1814	-2,8		
7	1326	1,0	1024	2,1			1541	-1,9	1122	-2,7		
8	779	1,0	853	2,1			1952	-1,9	1838	-2,7		
9	650	1,0	955	2,2			958	-1,9	1076	-2,6		
10	590	1,0	771	2,2			1485	-1,8	1826	-2,6		
11	568	1,0	990	2,2			1215	-1,8	1818	-2,6		
12	651	1,0	585	2,3			1009	-1,8	1033	-2,6		
13	572	1,0	555	2,3			1830	-1,8	1824	-2,6		
14	1915	1,0	878	2,3			1028	-1,8	1761	-2,6		
15	1909	1,0	2009	2,4			1832	-1,8	1827	-2,5		
16	566	1,0	561	2,6			1050	-1,8	1828	-2,5		
17	711	1,0	1307	2,7			1054	-1,8	1032	-2,5		
18	2001	1,0	1012	2,9			1143	-1,8	1823	-2,5		
19	718	1,0	875	2,9			1039	-1,8	1121	-2,5		
20	1205	1,0					1784	-1,8	1837	-2,5		
21	1247	1,0					1390	-1,8	962	-2,4		
22	778	1,0					1029	-1,8	1078	-2,4		
23	610	1,0					1144	-1,8	1075	-2,4		
24	723	1,0					900	-1,7	1833	-2,4		
25	818	1,0					1233	-1,7	1820	-2,4		
26	1655	1,0					1112	-1,7	1079	-2,3		
27	1706	1,0					1617	-1,7	1836	-2,3		
28	864	1,0					1263	-1,7	1304	-2,3		
29	938	1,0					1242	-1,6	1831	-2,3		

Таблица 4. 2. Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное для периода с 516 г. по 2009 г. н. э. для хронологии по δ¹⁸О в целлюлозе годичных колец лиственниц, произрастающих на востоке Таймыра.

30	724	1,1			1388	-1,6	927	-2,3	
31	533	1,1			1808	-1,6	1817	-2,2	
32	626	1,1			1110	-1,6	1819	-2,2	
33	1104	1,1			1106	-1,6	1218	-2,2	
34	2000	1,1			1767	-1,6	1034	-2,1	
35	1189	1,1			1821	-1,6	871	-2,1	
36	917	1,1			1277	-1,6	974	-2,1	
37	1536	1,1			1811	-1,6	1080	-2,1	
38	1719	1,1			1812	-1,6	1829	-2,1	
39	763	1,1			1813	-1,6	1046	-2,1	
40	1038	1,1			1353	-1,6	1816	-2,0	
41	564	1,1			1289	-1,6	1333	-2,0	
42	991	1,1			1765	-1,6	1292	-2,0	
43	1597	1,1			1864	-1,6			
44	705	1,1			1394	-1,6			
45	579	1,1			1220	-1,6			
46	954	1,1			1288	-1,6			
47	1008	1,1			1668	-1,6			
48	1114	1,1			1068	-1,6			
49	931	1,1			1264	-1,6			
50	918	1,1			1764	-1,5			
51	1284	1,1			1025	-1,5			
52	984	1,1			1839	-1,5			
53	1207	1,1			1350	-1,5			
54	652	1,1			1241	-1,5			
55	1103	1,1			1395	-1,5			
56	1001	1,1			1766	-1,5			
57	577	1,1			1763	-1,5			
58	611	1,1			1980	-1,5			
59	775	1,1			1074	-1,5			
60	742	1,1			1759	-1,5			
61	554	1,1			1184	-1,5			
62	583	1,1			901	-1,5			
63	1990	1,1			1387	-1,5			

64	567	1,1			1610	-1,5		
65	529	1,1			1213	-1,5		
66	1872	1,1			1057	-1,5		
67	635	1,1			1291	-1,5		
68	593	1,1			1774	-1,5		
69	766	1,2			1743	-1,4		
70	754	1,2			1798	-1,4		
71	1105	1,2			1930	-1,4		
72	1639	1,2			1937	-1,4		
73	1676	1,2			1474	-1,4		
74	715	1,2			1133	-1,4		
75	1601	1,2			1052	-1,4		
76	622	1,2			1755	-1,4		
77	1752	1,2			1758	-1,4		
78	874	1,2			1768	-1,4		
79	726	1,2			1473	-1,4		
80	1528	1,2			1580	-1,4		
81	1658	1,2			1047	-1,4		
82	710	1,2			1082	-1,4		
83	869	1,2			1929	-1,4		
84	582	1,2			1609	-1,4		
85	714	1,2			1243	-1,4		
86	1053	1,2			1417	-1,4		
87	858	1,2			1568	-1,4		
88	838	1,2			1762	-1,4		
89	1020	1,2			1349	-1,4		
90	1002	1,2			1429	-1,4		
91	807	1,2			1108	-1,4		
92	751	1,2			1483	-1,4		
93	1970	1,2			1302	-1,4		
94	782	1,2			1389	-1,4		
95	1272	1,2			1398	-1,3		
96	883	1,2			1083	-1,3		
97	1273	1,2			973	-1,3		

$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $									1
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	98	1190	1,2			1081	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	99	802	1,2			1251	-1,3		-
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	100	671	1,2			1295	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	101	624	1,2			964	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	102	1871	1,2			1224	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	103	524	1,2			1785	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	104	781	1,2			1863	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	105	1492	1,2			1475	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	106	822	1,2			1606	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	107	755	1,2			1672	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	108	847	1,2			1962	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	109	813	1,2			1927	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	110	732	1,2			1739	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	111	865	1,2			1048	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	112	1117	1,2			1504	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	113	947	1,3			1415	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	114	834	1,3			971	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	115	614	1,3			1391	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	116	1581	1,3			1423	-1,3		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	117	1533	1,3			1738	-1,3		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	118	620	1,3			999	-1,3		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	119	872	1,3			1954	-1,3		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	120	745	1,3			1065	-1,3		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	121	588	1,3			1740	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	122	748	1,3			1918	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	123	785	1,3			1928	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	124	713	1,3			1961	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	125	727	1,3			1618	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	126	740	1,3			1773	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	127	729	1,3			1142	-1,2		
129 744 1,3 1070 -1,2 130 603 1,3 1320 -1,2 131 758 1,3 1300 -1,2	128	653	1,3			1559	-1,2		
130 603 1,3 1320 -1,2 131 131 758 1,3 1300 -1,2 1300 -1,2 1300 -1,2 1300 -1,2 1300 -1,2 1300 -1,2 1300 -1,2 1300 1300 -1,2 1300 1300 -1,2 1300 1300 -1,2 1300	129	744	1,3			1070	-1,2		
131 758 1,3 1300 -1,2	130	603	1,3			1320	-1,2		
	131	758	1,3			1300	-1,2		

$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$					1				T
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	132	578	1,3			1165	-1,2		
134 821 1.3 1885 -1.2 135 1107 1.3 1800 -1.2 136 1325 1.3 1607 -1.2 137 981 1.3 1769 -1.2 1 138 612 1.3 1015 -1.2 1 139 772 1.3 1015 -1.2 1 140 975 1.4 1414 -1.2 1 141 613 1.4 1124 -1.2 1 143 1099 -1.2 1 1 1 144 594 1.4 1914 -1.2 1 144 594 1.4 1914 -1.2 1 144 594 1.4 1914 -1.2 1 144 594 1.4 1124 -1.2 1 144 735 1.4 1904 -1.2 1 147 736 1.4 1126 -1.2 1 148 735 1.4<	133	556	1,3			1507	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	134	821	1,3			1885	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	135	1107	1,3			1800	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	136	1325	1,3			1607	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	137	981	1,3			1807	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	138	612	1,3			1769	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	139	772	1,3			1015	-1,2		
141 613 1,4 1124 -1,2 124 142 580 1,4 1410 -1,2 141 143 1099 1,4 995 -1,2 141 144 594 1,4 1914 -1,2 141 144 594 1,4 1305 -1,2 141 144 594 1,4 1305 -1,2 141 144 722 1,4 1305 -1,2 141 146 888 1,4 1744 -1,2 141 147 736 1,4 1904 -1,2 141 148 735 1,4 1904 -1,2 141 149 823 1,4 1914 1126 -1,2 141 150 1992 1,4 1126 -1,2 141 151 151 1640 1,4 1126 -1,1 141 151 153 728 1,4 1145 -1,1 141 155 155 796 1,4 <td>140</td> <td>975</td> <td>1,4</td> <td></td> <td></td> <td>1414</td> <td>-1,2</td> <td></td> <td></td>	140	975	1,4			1414	-1,2		
142 580 1.4 1410 -1.2 143 1099 1.4 995 -1.2 144 594 1.4 1914 -1.2 145 722 1.4 1305 -1.2 146 888 1.4 1744 -1.2 146 888 1.4 1744 -1.2 147 736 1.4 1182 -1.2 148 735 1.4 1904 -1.2 149 823 1.4 1904 -1.2 149 823 1.4 1904 -1.2 150 1992 1.4 1126 -1.2 151 1640 1.4 1605 -1.2 152 530 1.4 1197 -1.1 153 728 1.4 11265 -1.1 154 762 1.4 1278 -1.1 155 796 1.4 1278 -1.1	141	613	1,4			1124	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	142	580	1,4			1410	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	143	1099	1,4			995	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	144	594	1,4			1914	-1,2		
146 888 1,4 1744 $-1,2$ 147 147 736 1,4 1182 $-1,2$ 148 148 735 1,4 1904 $-1,2$ 149 149 823 1,4 1931 $-1,2$ 149 150 1992 1,4 1126 $-1,2$ 149 151 1640 1,4 1605 $-1,2$ 149 152 530 1,4 1197 $-1,1$ 145 153 728 1,4 1145 $-1,1$ 145 154 762 1,4 1145 $-1,1$ 145 155 796 1,4 1265 $-1,1$ 145 155 796 1,4 1278 $-1,1$ 145 155 796 1,4 1386 $-1,1$ 1424 157 1019 1,4 1424 $-1,1$ 1424 158 741 1,4 1386 $-1,1$ 1414 160 565 1,4 1705 $-1,1$	145	722	1,4			1305	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	146	888	1,4			1744	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	147	736	1,4			1182	-1,2		
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	148	735	1,4			1904	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	149	823	1,4			1931	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	150	1992	1,4			1126	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	151	1640	1,4			1605	-1,2		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	152	530	1,4			1197	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	153	728	1,4			1145	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	154	762	1,4			1775	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	155	796	1,4			1265	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	156	573	1,4			1278	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	157	1019	1,4			1424	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	158	741	1,4			1386	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	159	789	1,4			1434	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	160	565	1,4			1705	-1,1		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	161	709	1,4		1	1016	-1,1		1
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	162	784	1,4			1862	-1,1		1
164 820 1,4 976 -1,1 165 972 1,4 1185 -1,1	163	882	1,4		1	1742	-1,1		1
165 972 1,4 1185 -1,1	164	820	1,4			976	-1,1		1
	165	972	1,4			1185	-1,1		1

166	783	1,4			1920	-1,1		
167	627	1,4			1664	-1,1		
168	839	1,4			1938	-1,1		
169	812	1,5			904	-1,1		
170	597	1,5			1913	-1,1		
171	575	1,5			827	-1,1		
172	601	1,5			1569	-1,1		
173	558	1,5			1040	-1,1		
174	708	1,5			1729	-1,1		
175	942	1,5			1840	-1,1		
176	854	1,5			1237	-1,1		
177	1021	1,5			1865	-1,0		
178	733	1,5			1710	-1,0		
179	1852	1,5			1966	-1,0		
180	1018	1,5			1745	-1,0		
181	859	1,5			1539	-1,0		
182	849	1,5			1747	-1,0		
183	840	1,6			1022	-1,0		
184	2008	1,6			1286	-1,0		
185	1089	1,6			1448	-1,0		
186	598	1,6			1396	-1,0		
187	1308	1,6			1467	-1,0		
188	855	1,6			1903	-1,0		
189	819	1,6			1411	-1,0		
190	1177	1,6			1334	-1,0		
191	1314	1,6			1248	-1,0		
192	1090	1,6			1638	-1,0		
193	759	1,6			1936	-1,0		
194	963	1,6			967	-1,0		
195	876	1,6			1801	-1,0		
196	873	1,6			1540	-1,0		
197	734	1,6			1055	-1,0		
198	1120	1,6			1612	-1,0		
199	749	1,6			960	-1,0		

200	1283	16			1451	-1.0		
200	1205	1,0			1939	-1,0		
202	559	1,3			1290	-1.0		
202	797	1,7			1397	-1.0		
203	739	1,7			828	-1.0		
205	773	1.7			1963	-1.0		
206	930	1.7			621	-1.0		
207	879	1.7			1730	-1.0		
208	948	1.7			1981	-1,0		
209	1282	1.7			1737	-1.0		
210	956	1,7				,		
211	712	1,7						
212	880	1,7						
213	615	1,7						
214	1435	1,7						
215	562	1,7						
216	1691	1,7						
217	870	1,7						
218	851	1,7						
219	860	1,8						
220	892	1,8						
221	850	1,8						
222	591	1,8						
223	672	1,8						
224	852	1,8						
225	1111	1,8						
226	581	1,8						
227	618	1,8						
228	760	1,8						
229	589	1,8						
230	801	1,8						
231	616	1,8						
232	560	1,8						
233	738	1,8						

234	1877	1,8					
235	584	1,9					
236	877	1,9					
237	731	1,9					
238	1200	1,9					
239	774	1,9					
240	761	1,9					
241	1878	1,9					
242	1555	1,9					

Номер												
строки	Год	<u>≤</u> +1σ	Год	<u>≤</u> +2σ	Год	<u>≤</u> +3σ	Год	<u>≤</u> -3σ	Год	<u>≤</u> -2σ	Год	<u>≤</u> -1σ
1	1118	1,0	1810	2,0	2016	3,2	629	-3,1	858	-2,0	1209	-1,9
2	1138	1,0	1948	2,0			638	-3,1	1151	-2,2	1445	-1,9
3	1082	1,0	1910	2,0			686	-3,6	1152	-2,0	689	-1,9
4	1265	1,0	1086	2,0			1487	-3,2	1184	-2,1	1437	-1,9
5	1279	1,0	917	2,0			1489	-3,1	1204	-2,6	1694	-1,9
6	1401	1,0	1132	2,0			1704	-3,2	1206	-2,3	1774	-1,9
7	916	1,0	1511	2,0			1706	-3,2	1292	-2,3	1480	-1,8
8	1104	1,0	1992	2,0					1322	-2,3	540	-1,8
9	1134	1,0	1893	2,0					1379	-2,0	539	-1,8
10	1938	1,0	2001	2,0					1380	-2,3	548	-1,8
11	1100	1,0	1405	2,0					1424	-2,7	562	-1,8
12	1023	1,0	2008	2,0					1425	-2,0	1431	-1,8
13	1285	1,0	1230	2,0					1427	-2,1	1291	-1,8
14	1523	1,0	1266	2,1					1475	-2,6	854	-1,8
15	1781	1,0	1909	2,2					1477	-2,7	1775	-1,8
16	1599	1,0	1808	2,2					1479	-2,9	1426	-1,8
17	1139	1,0	1999	2,3					1485	-2,9	1327	-1,8
18	1143	1,0	952	2,3					1486	-2,4	574	-1,8
19	1222	1,0	1949	2,4					1492	-2,6	1422	-1,8
20	1474	1,0	2013	2,4					1696	-2,5	541	-1,8
21	1124	1,0	2012	2,4					1702	-2,7	1463	-1,7
22	1783	1,0	2002	2,5					1958	-2,3	545	-1,7
23	1149	1,0	1974	2,6							1185	-1,7
24	1614	1,0	2009	2,6							1478	-1,7
25	1135	1,0	2015	2,7							1194	-1,7
26	1228	1,0	1963	2,8							1415	-1,7
27	1237	1,0	985	2,9							1566	-1,7

Таблица 5. 1. Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное для периода с 520 г. по 2016 г. н. э. для хронологии по δ¹³С в целлюлозе годичных колец лиственниц, произрастающих в районе Монгун-тайга (Алтай).

28	1929	1,0				1321	-1,7
29	1944	1,0				547	-1,7
30	1660	1,0				855	-1,7
31	1509	1,0				542	-1,6
32	949	1,0				1434	-1,6
33	1954	1,0				660	-1,6
34	1284	1,0				1207	-1,6
35	1920	1,0				544	-1,6
36	1788	1,0				856	-1,6
37	1960	1,1				1313	-1,6
38	1789	1,1				538	-1,6
39	1952	1,1				1768	-1,6
40	1924	1,1				594	-1,6
41	1127	1,1				1703	-1,6
42	678	1,1				1335	-1,6
43	1936	1,1				1154	-1,6
44	1793	1,1				590	-1,6
45	1872	1,1				595	-1,6
46	1968	1,1				1153	-1,6
47	1009	1,1				1355	-1,6
48	1234	1,1				1324	-1,6
49	1895	1,1				549	-1,6
50	1951	1,1				1304	-1,6
51	918	1,1				1590	-1,6
52	1243	1,1				1288	-1,6
53	1095	1,1				1534	-1,5
54	1818	1,1				850	-1,5
55	1076	1,1				1213	-1,5
56	1201	1,1				886	-1,5
57	1863	1,1				1344	-1,5
58	1407	1,1				710	-1,5
59	1137	1,1				888	-1,5
60	1002	1,1				885	-1,5
61	1859	1,1				1685	-1,5

62	1753	1,1					1348	-1,5
63	1025	1,1					1533	-1,5
64	1966	1,1					1531	-1,5
65	1881	1,1					1767	-1,5
66	1943	1,1					649	-1,5
67	1277	1,1					1417	-1,5
68	1814	1,1					1367	-1,5
69	1094	1,1					690	-1,5
70	1116	1,1					659	-1,5
71	1125	1,1					1770	-1,5
72	1281	1,1					1316	-1,5
73	981	1,1					1309	-1,5
74	1805	1,1					776	-1,5
75	1919	1,1					1290	-1,5
76	1819	1,1					529	-1,4
77	1251	1,1					1562	-1,4
78	1825	1,1					1682	-1,4
79	1229	1,1					1705	-1,4
80	1617	1,1					593	-1,4
81	1629	1,1					768	-1,4
82	1386	1,2					535	-1,4
83	1784	1,2					522	-1,4
84	1024	1,2					600	-1,4
85	1128	1,2					1183	-1,4
86	1123	1,2					1205	-1,4
87	2003	1,2					1687	-1,4
88	912	1,2					1413	-1,4
89	1338	1,2					841	-1,4
90	1131	1,2					650	-1,4
91	1319	1,2					739	-1,4
92	1847	1,2					1297	-1,4
93	1110	1,2					1164	-1,4
94	1651	1,2					844	-1,3
95	1884	1,2					1448	-1,3

96	1264	1,2					1540	-1,3
97	1626	1,2					1544	-1,3
98	1069	1,2					588	-1,3
99	908	1,2					1416	-1,3
100	1616	1,2					1707	-1,3
101	1639	1,2					1343	-1,3
102	1136	1,2					599	-1,3
103	1253	1,2					1182	-1,3
104	1787	1,2					1530	-1,3
105	869	1,2					564	-1,3
106	1518	1,2					1766	-1,3
107	964	1,2					1777	-1,3
108	1637	1,2					1684	-1,3
109	1829	1,2					1449	-1,3
110	1792	1,2					1683	-1,3
111	1062	1,2					1186	-1,3
112	2000	1,2					1446	-1,3
113	1623	1,2					524	-1,3
114	1791	1,2					543	-1,3
115	1860	1,2					520	-1,3
116	1122	1,2					1465	-1,3
117	1806	1,2					528	-1,3
118	1861	1,3					1444	-1,3
119	1935	1,3					610	-1,2
120	2011	1,3					857	-1,2
121	1982	1,3					550	-1,2
122	1027	1,3					1496	-1,2
123	1595	1,3					601	-1,2
124	983	1,3					1323	-1,2
125	1804	1,3					565	-1,2
126	1470	1,3					546	-1,2
127	1239	1,3					1476	-1,2
128	1603	1,3					580	-1,2
129	1036	1,3					840	-1,2

130	1233	1,3					1464	-1,2
131	1969	1,3					1505	-1,2
132	1340	1,3					813	-1,2
133	628	1,3					1661	-1,2
134	1046	1,3					1769	-1,2
135	1821	1,3					692	-1,2
136	1977	1,3					777	-1,2
137	1937	1,3					787	-1,2
138	1947	1,3					1439	-1,2
139	1879	1,3					1500	-1,2
140	1601	1,3					1581	-1,2
141	1068	1,3					1170	-1,2
142	1238	1,3					1543	-1,2
143	1039	1,3					569	-1,2
144	965	1,3					536	-1,2
145	1820	1,3					723	-1,2
146	1108	1,3					766	-1,2
147	679	1,3					1368	-1,2
148	1503	1,3					1549	-1,2
149	1597	1,3					579	-1,2
150	1816	1,3					1307	-1,2
151	1930	1,4					1215	-1,2
152	1510	1,4					1535	-1,1
153	1927	1,4					1689	-1,1
154	1031	1,4					1695	-1,1
155	1917	1,4					661	-1,1
156	1653	1,4					884	-1,1
157	1240	1,4					958	-1,1
158	1883	1,4					1584	-1,1
159	1017	1,4					1720	-1,1
160	1955	1,4					1575	-1,1
161	2010	1,4					551	-1,1
162	1918	1,4					1666	-1,1
163	747	1,4					570	-1,1

164	1911	1,4					1701	-1,1
165	1903	1,4					596	-1,1
166	1794	1,4					1688	-1,1
167	1598	1,4					1172	-1,1
168	1858	1,4					736	-1,1
169	920	1,4					566	-1,1
170	1231	1,4					1674	-1,1
171	1780	1,4					773	-1,1
172	1905	1,4					1414	-1,1
173	1018	1,5					767	-1,1
174	1268	1,5					684	-1,1
175	1043	1,5					1156	-1,1
176	1822	1,5					1676	-1,1
177	1040	1,5					726	-1,1
178	1457	1,5					883	-1,1
179	1894	1,5					814	-1,1
180	1604	1,5					1583	-1,1
181	1283	1,5					1366	-1,1
182	1995	1,5					1668	-1,1
183	1809	1,5					1360	-1,1
184	1657	1,5					737	-1,1
185	1106	1,5					1582	-1,0
186	1813	1,5					559	-1,0
187	1908	1,5					557	-1,0
188	984	1,5					1438	-1,0
189	1656	1,5					687	-1,0
190	1950	1,5					1317	-1,0
191	1227	1,5					758	-1,0
192	683	1,5					1369	-1,0
193	2004	1,5					647	-1,0
194	1964	1,5					1765	-1,0
195	1975	1,5					728	-1,0
196	1278	1,6					1295	-1,0
197	1892	1,6					853	-1,0

198	1645	1,6					700	-1,0
199	1973	1,6					1354	-1,0
200	1891	1,6					864	-1,0
201	963	1,6					1310	-1,0
202	681	1,6					1776	-1,0
203	1857	1,6					1577	-1,0
204	1026	1,6					521	-1,0
205	1226	1,6					1353	-1,0
206	1812	1,6					1887	-1,0
207	1882	1,6					735	-1,0
208	1101	1,7					1493	-1,0
209	1654	1,7					843	-1,0
210	1945	1,7					1553	-1,0
211	1997	1,7					772	-1,0
212	1807	1,7					731	-1,0
213	1983	1,7					1202	-1,0
214	2014	1,7					761	-1,0
215	2006	1,7					1565	-1,0
216	1953	1,7					1171	-1,0
217	1709	1,7					866	-1,0
218	1016	1,7					1712	-1,0
219	1979	1,7					1397	-1,0
220	2005	1,7					616	-1,0
221	1980	1,7					1545	-1,0
222	1996	1,7					1192	-1,0
223	1823	1,7					1258	-1,0
224	1403	1,7					555	-1,0
225	1965	1,7					1547	-1,0
226	1902	1,7					693	-1,0
227	1513	1,8					1817	-1,0
228	1129	1,8					771	-1,0
229	950	1,8					567	-1,0
230	948	1,8						
231	1647	1,8						

232	1270	1,8					
233	1946	1,8					
234	1236	1,8					
235	1235	1,8					
236	1991	1,8					
237	1981	1,8					
238	1087	1,8					
239	1811	1,8					
240	1646	1,8					
241	1067	1,8					
242	1099	1,8					
243	1904	1,8					
244	1613	1,9					
245	915	1,9					
246	1998	1,9					
247	1956	1,9					

Номер												
строки	Год	≤+1σ	Год	<u>≤</u> +2σ	Год	<u>≤</u> +3σ	Год	<u>≤</u> -1σ	Год	≤- 2σ	Год	≤- 3σ
1	520	1,37	526	2,88	522	3,03	564	-1,25	929	-2,16	536	-6,27
2	521	1,81	532	2,14	1266	4,10	593	-1,16	930	-2,37		
3	524	1,25	554	2,31	2001	4,00	775	-1,23	932	-2,55		
4	525	1,91	587	2,20	2002	3,76	897	-1,19	1102	-2,14		
5	527	1,58	589	2,27	2005	3,06	923	-1,37	1456	-2,04		
6	530	1,54	601	2,48	2007	3,04	926	-1,50	1547	-2,02		
7	533	1,66	608	2,38	2008	4,37	933	-1,59	1549	-2,26		
8	539	1,08	611	2,39	2009	4,31	934	-1,05	1558	-2,91		
9	552	1,10	613	2,16	2012	3,69	935	-1,35	1566	-2,16		
10	553	1,69	617	2,69	2013	3,13	937	-1,18	1567	-2,08		
11	555	1,60	621	2,35	2015	3,21	938	-1,44	1578	-2,10		
12	556	1,48	622	2,32			942	-1,94	1579	-2,76		
13	559	1,57	623	2,23			943	-1,65	1587	-2,46		
14	562	1,55	649	2,22			951	-1,26	1590	-2,78		
15	570	1,54	1264	2,61			953	-1,33	1649	-2,68		
16	577	1,56	1843	2,23			955	-1,45	1662	-2,05		
17	579	1,50	1860	2,03			959	-1,84	1684	-2,29		
18	582	1,61	1894	2,00			976	-1,31	1801	-2,01		
19	583	1,13	2000	2,68			1006	-1,79	1805	-2,22		
20	584	1,27	2003	2,84			1051	-1,29	1809	-2,31		
21	588	1,20	2004	2,06			1052	-1,08	1871	-2,41		
22	590	1,65	2006	2,78			1053	-1,26	1889	-2,42		
23	592	1,49	2010	2,77			1055	-1,48	1912	-2,65		
24	598	1,53	2011	2,80			1056	-1,06	1941	-2,77		
25	599	1,28	2014	2,88			1058	-1,00	1958	-2,32		
26	600	1,63	2016	2,06			1061	-1,50	1959	-2,52		
27	602	1,45					1062	-1,11	1960	-2,72		
28	603	1,04					1066	-1,28	1961	-2,34		
29	604	1,36					1077	-1,27	1967	-2,04		

Таблица 5. 2. Среднеквадратическое отклонение, рассчитанное для периода с 520 г. по 2016 г. для хронологии по δ^{18} О в целлюлозе годичных колец лиственниц, произрастающих в районе Монгун-тайга (Алтай).

30	605	1,83			1078	-1,24	1984	-2,80	
31	607	1,37			1080	-1,08	1993	-2,42	
32	609	1,09			1082	-1,60			
33	614	1,50			1083	-1,10			
34	615	1,93			1084	-1,15			
35	616	1,89			1085	-1,38			
36	618	1,69			1091	-1,43			
37	620	1,93			1096	-1,95			
38	625	1,24			1097	-1,82			
39	627	1,03			1124	-1,04			
40	629	1,40			1136	-1,16			
41	631	1,11			1137	-1,78			
42	638	1,50			1141	-1,36			
43	647	1,19			1152	-1,14			
44	654	1,45			1153	-1,22			
45	655	1,31			1163	-1,89			
46	665	1,09			1194	-1,09			
47	666	1,45			1200	-1,14			
48	667	1,33			1203	-1,30			
49	669	1,11			1206	-1,09			
50	670	1,46			1232	-1,71			
51	671	1,10			1235	-1,68			
52	673	1,17			1242	-1,44			
53	677	1,16			1252	-1,49			
54	681	1,06			1257	-1,37			
55	690	1,15			1258	-1,22			
56	692	1,07			1260	-1,09			
57	700	1,27			1269	-1,25			
58	701	1,61			1357	-1,07			
59	706	1,21			1368	-1,27			
60	710	1,28			1434	-1,15			
61	713	1,18			1435	-1,27			
62	716	1,04			1437	-1,90			
63	719	1,44			1444	-1,49			

64	722	1 12		1	445	-1.82		
65	724	1.35		1	447	-1.21		
66	731	1,20		1	448	-1,77		
67	742	1,08		1	449	-1,57		
68	747	1,46		1	454	-1,26		
69	758	1,10		1	455	-1,90		
70	768	1,09		1	457	-1,39		
71	769	1,00		1	458	-1,15		
72	791	1,18		1	459	-1,40		
73	792	1,09		1	460	-1,33		
74	807	1,19		1	461	-1,12		
75	811	1,12		1	463	-1,04		
76	814	1,00		1	465	-1,13		
77	815	1,88		1	467	-1,02		
78	820	1,25		1	499	-1,41		
79	827	1,19		1	504	-1,18		
80	830	1,19		1	520	-1,55		
81	831	1,38		1	527	-1,24		
82	853	1,23		1	533	-1,83		
83	856	1,36		1	540	-1,41		
84	879	1,02		1	543	-1,92		
85	881	1,67		1	544	-1,51		
86	882	1,11		1	545	-1,36		
87	900	1,45		1	546	-1,91		
88	901	1,12		1	548	-1,25		
89	904	1,44		1	550	-1,39		
90	905	1,70		1	551	-1,75		
91	912	1,22		1	552	-1,02		
92	948	1,23		1	553	-1,22		
93	957	1,11		1	554	-1,51		
94	958	1,10		1	556	-1,53		
95	965	1,37		1	557	-1,08		
96	1002	1,19		1	559	-1,29		
97	1007	1,32		1	562	-1,43		

98	1027	1,30		1568	-1,19		
99	1036	1,21		1570	-1,84		
100	1040	1,41		1571	-1,47		
101	1110	1,54		1572	-1,06		
102	1145	1,13		1573	-1,07		
103	1162	1,11		1574	-1,87		
104	1166	1,07		1575	-1,25		
105	1173	1,86		1576	-1,93		
106	1176	1,01		1577	-1,85		
107	1178	1,12		1580	-1,58		
108	1179	1,51		1581	-1,24		
109	1187	1,06		1582	-1,43		
110	1188	1,00		1583	-1,05		
111	1210	1,32		1584	-1,40		
112	1216	1,11		1585	-1,71		
113	1217	1,25		1586	-1,40		
114	1246	1,45		1588	-1,51		
115	1248	1,15		1609	-1,30		
116	1256	1,60		1619	-1,21		
117	1267	1,14		1648	-1,13		
118	1279	1,19		1659	-1,83		
119	1286	1,58		1663	-1,67		
120	1294	1,27		1666	-1,23		
121	1318	1,21		1667	-1,65		
122	1328	1,71		1668	-1,36		
123	1329	1,48		1670	-1,25		
124	1344	1,16		1671	-1,59		
125	1420	1,37		1676	-1,73		
126	1485	1,11		1678	-1,22		
127	1597	1,41		1679	-1,46		
128	1598	1,55		1680	-1,89		
129	1599	1,44		1682	-1,81		
130	1600	1,13		1683	-1,23		
131	1601	1,12		1700	-1,42		

132	1622	1,11		1701	-1,02		
133	1637	1,21		1702	-1,55		
134	1650	1,07		1703	-1,00		
135	1685	1,01		1706	-1,23		
136	1709	1,71		1707	-1,01		
137	1716	1,14		1740	-1,51		
138	1733	1,13		1741	-1,23		
139	1789	1,60		1742	-1,26		
140	1800	1,33		1743	-1,39		
141	1811	1,61		1744	-1,62		
142	1813	1,73		1746	-1,22		
143	1827	1,13		1747	-1,05		
144	1828	1,36		1748	-1,37		
145	1829	1,48		1749	-1,02		
146	1830	1,22		1753	-1,09		
147	1831	1,71		1773	-1,01		
148	1833	1,71		1774	-1,20		
149	1837	1,03		1779	-1,59		
150	1839	1,02		1785	-1,05		
151	1840	1,62		1795	-1,02		
152	1842	1,69		1796	-1,15		
153	1857	1,92		1797	-1,04		
154	1872	1,09		1822	-1,19		
155	1891	1,54		1869	-1,71		
156	1892	1,71		1873	-1,25		
157	1893	1,24		1874	-1,45		
158	1900	1,74		1883	-1,26		
159	1980	1,76		1884	-1,43		
160	1987	1,74		1885	-1,56		
161	1998	1,40		1886	-1,60		
162				1887	-1,55		
163				1898	-1,09		
164				1906	-1,45		
165				1907	-1,30		

166			1908	-1,16		
167			1911	-1,75		
168			1915	-1,38		
169			1919	-1,18		
170			1921	-1,58		
171			1926	-1,00		
172			1928	-1,13		
173			1932	-1,04		
174			1933	-1,10		
175			1942	-1,26		
176			1950	-1,47		
177			1955	-1,27		
178			1957	-1,93		
179			1962	-1,00		
180			1964	-1,57		
181			1965	-1,63		
182			1966	-1,37		
183			1969	-1,32		
184			1970	-1,03		
185			1972	-1,29		
186			1973	-1,65		
187			1975	-1,12		
188			1977	-1,67		
189			1983	-1,05		
190			1985	-1,75		
191			1988	-1,73		
192			1989	-1,35		
193			1994	-1,24		
194			1995	-1,46		

Таблица 6. 1. Набор δ¹³С хронологий, использованных в модели LPX – Берн [Keller et al., 2017] для моделирования эффективности использования воды древесными растениями.

Номер	Район исследования	Страна	Период	Широта	Долгота	Литература
1	Дахштайн	Австрия	1900-1996	47,28	13,36	Saurer et al., 2014
2	Лаинцер	Австрия	1900-2003	48,18	16,2	Treydte et al., 2007
3	Пилау	Австрия	1900-2002	47,95	16,06	Treydte et al., 2007
4	Колумбич	Канада	1900-1990	52,5	118	Edwards et al., 2008
5	Бромав	Финляндия	1901-2002	60	23,08	Treydte et al., 2007
6	Иломантси	Финляндия	1900-2002	62,98	30,98	Treydte et al., 2008
7	Кесси	Финляндия	1900-2002	68,93	28,42	Treydte et al., 2009
8	Лаанила	Финляндия	1900-2002	68,5	27,5	Gagen et al., 2011
9	Турку	Финляндия	1900-1994	60,41	22,17	Robertson et al., 1997
10	Фонтаненблю	Франция	1900-2000	48,38	2,67	Treydte et al., 2007
11	Реннес	Франция	1900-1999	48,25	1,7	Treydte et al., 2007
12	Дрансфельд	Германия	1900-2002	51,5	9,78	Treydte et al., 2007
13	Франкония	Германия	1900-2005	49,15	11	Saurer et al., 2014
14	Монте Чимино	Италия	1900-2005	42,41	12,2	Keller et al., 2017
15	Серра ди Криспо	Италия	1900-2003	39,93	16,2	Treydte et al., 2007
16	Тренто	Италия	1900-2004	46,04	11,66	Saurer et al., 2014
17	Панемунес	Литва	1900-2002	54,88	23,97	Treydte et al., 2007
18	Коль ду Цад	Морокко	1900-2000	32,97	5,07	Treydte et al., 2007
19	Фордфройдан	Норвегия	1900-2001	68,79	15,72	Young et al., 2012

20	Гутулия	Норвегия	1900-2003	62	12,18	Treydte et al., 2007
21	Багрот	Пакистан	1900-1998	35,9	74,93	Treydte et al., 2006
22	Боибар	Пакистан	1900-1998	36,62	74,98	Treydte et al., 2006
23	Пуэрто	Перу	1900-2004	12,6	69,2	Ballantyne et al., 2011
24	Ниополомис 1	Польша	1900-2003	50,12	20,38	Treydte et al., 2007
25	Ниополомис 2	Польша	1900-2003	50,12	20,38	Treydte et al., 2007
26	Сувалки	Польша	1900-2003	54,1	22,93	Treydte et al., 2007
27	Шувалки	Польша	1900-2003	54,10	22,93	Treydte et al., 2007
28	Кукуракена	Румыния	1900-2005	47,4	25,08	Keller et al., 2017
29	Джималу	Румыния	1900-2005	47,45	25,45	Keller et al., 2017
30	Алтай	Российская Федерация	1900-2005	50,23	89,04	Sidorova et al., 2012
31	Индигирка	Российская Федерация	1900-2004	70	148	Sidorova et al., 2008
32	Хакасия	Российская Федерация	1900-2005	54,41	89,96	Knorre et al., 2010
33	Хибины	Российская Федерация	1900-2005	67,41	33,15	Saurer et al., 2014
34	Таймыр	Российская Федерация	1900-2005	72	102	Sidorova et al., 2010
35	Тура	Российская Федерация	1900-2005	62.32	100,14	Sidorova et al., 2009
36	Хлина Долина 1	Словакия	1900-2005	49.19	19,9	Keller et al., 2017
37	Хлина Долина 2	Словакия	1900-2005	49.19	19,9	Keller et al., 2017
38	Веца	Словения	1907-2005	46.37	13,69	Saurer et al., 2014
39	Пафури	Южная Африка	1900-2005	22,7	31,25	Woodborne et al., 2015
40	Кацаролла	Испания	1900-2005	37,81	2,96	Treydte et al., 2007
41	Пинар дель Лилио	Испания	1900-2002	43,07	5,25	Treydte et al., 2007
42	Педрафорка	Испания	1900-2005	42,24	1,7	Treydte et al., 2007
43	Фуруберже	Швеция	1900-2005	63,16	13,5	Saurer et al., 2014

44	Торнетраск	Швеция	1900-2005	68,22	19,72	Loader et al., 2013
45	Бетлахшток	Швейцария	1900-1995	47,22	7,42	Saurer et al., 2000
46	Каверно	Швейцария	1900-2003	46,35	8,6	Treydte et al., 2007
47	Давос	Швейцария	1900-2005	46,82	9,86	Keller et al., 2017
48	Люцерн	Швейцария	1900-2005	47,48	8,36	Keller et al., 2017
49	Летченталь 1	Швейцария	1900-2004	46,43	7,8	Saurer et al., 2014
50	Летченталь 2	Швейцария	1900-2005	46,39	7,77	Keller et al., 2017
51	Салвенах	Швейцария	1900-2005	46,91	7,15	Kimak et al., 2015
52	Лоегерн	Швейцария	1900-2005	47,48	8,36	Klesse et al. in prep
	Шамплонх, Швейцарский					Churakova (Sidorova) et
53	Национальный Парк	Швейцария	1900-2005	46	10	al., 2016
54	Вигера	Швейцария	1900-2003	46,5	8,77	Treydte et al., 2007
55	Эльмали	Турция	1900-2005	36,6	30,02	Saurer et al., 2014
56	Лохвуд	Великобритания	1900-2003	55,27	3,43	Saurer et al., 2014
57	Сандриндхам	Великобритания	1900-1994	52,83	0,5	Saurer et al., 2014
58	Южный Упл	Великобритания	1907-2005	57,1	5,43	Saurer et al., 2014
59	Виндсор	Великобритания	1900-2003	51,41	0,59	Treydte et al., 2007
60	Вобурн	Великобритания	1900-2003	51,98	0,59	Treydte et al., 2007
61	Альтон	США	1900-1984	37,44	112,49	Leavitt et al., 2007
62	Ацтек	США	1900-1984	37	107,82	Leavitt et al., 2007
63	Бланко	США	1900-2005	37,45	118,17	Bale et al., 2011
64	Колорадо	США	1900-1984	35,28	107,72	Leavitt et al., 2007
65	Сухой Каньон	США	1900-1984	37,58	108,55	Leavitt et al., 2007
66	Гейт Каньон	США	1900-1984	39,88	110,23	Leavitt et al., 2007

67	Хауфорн	США	1900-1976	38,43	118,75	Leavitt et al., 2007
68	Кане Спрингс	США	1900-1984	37,52	109,9	Leavitt et al., 2007
69	Ламоил	США	1900-1978	40,69	115,47	Leavitt et al., 2007
70	Нижняя Колония	США	1900-1979	35,56	105,55	Leavitt et al., 2007
71	Мимбрес	США	1900-1980	33	107,93	Leavitt et al., 2007
72	Аризона	США	1900-1981	34,08	109,35	Leavitt et al., 2007
73	Аризона	США	1900-1982	34,83	111,98	Leavitt et al., 2007
74	Каньон	США	1900-1983	40,79	105,18	Leavitt et al., 2007
75	Океания 1	CIIIA	1900-1984	34,72	119,24	Leavitt et al., 2007
76	Океания 2	США	1900-1982	34,72	119,24	Leavitt et al., 2007

Таблица 9. 1. Коэффициенты корреляции, рассчитанные между параметрами годичных колец деревьев: δ¹⁸O, δ¹³C, максимальной плотности поздней древесины (MXD), ширины годичного кольца (TRW) и толщины клеточной стенки (CWT) 15 лет до и после вулканических извержений: (a) 535 г., (б) 540 г., (в) 542 г., (г) 1257 г., (д) 1640 г., (е) 1815 г., (ж) 1991 г. н. э.

(а) 535 г. н. э.

Парам	іетр		δ ¹⁸ Ο			δ ¹³ C			MXD			TRW			CWT	
		YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT
	YAK	1,00	0,30	0,22	0,54	0,47	0,66	0,54	0,82	0,10	-0,24	0,12	0,50	0,69	0,45	0,28
δ ¹⁸ Ο	TAY	0,30	1,00	0,42	0,77	0,89	0,25	0,33	0,43	0,60	0,43	0,61	0,53	0,64	0,74	0,61
	ALT	0,22	0,42	1,00	0,72	0,50	0,39	0,51	0,53	0,87	-0,04	0,34	0,56	0,30	0,57	0,88
	YAK	0,54	0,77	0,72	1,00	0,85	0,59	0,69	0,70	0,69	0,09	0,59	0,76	0,72	0,78	0,75
	TAY	0,47	0,89	0,50	0,85	1,00	0,62	0,53	0,56	0,59	0,33	0,71	0,85	0,86	0,87	0,72
δ ¹³ C	ALT	0,66	0,25	0,39	0,59	0,62	1,00	0,68	0,62	0,23	-0,07	0,47	0,87	0,81	0,63	0,48
	YAK	0,54	0,33	0,51	0,69	0,53	0,68	1,00	0,55	0,41	-0,07	0,34	0,62	0,62	0,47	0,51
	TAY	0,82	0,43	0,53	0,70	0,56	0,62	0,55	1,00	0,46	-0,17	0,16	0,60	0,64	0,61	0,59
MXD	ALT	0,10	0,60	0,87	0,69	0,59	0,23	0,41	0,46	1,00	0,30	0,47	0,49	0,29	0,74	0,95
	YAK	-0,24	0,43	-0,04	0,09	0,33	-0,07	-0,07	-0,17	0,30	1,00	0,58	0,05	0,26	0,39	0,18
	TAY	0,12	0,61	0,34	0,59	0,71	0,47	0,34	0,32	0,47	0,58	1,00	0,58	0,62	0,78	0,46
TRW	ALT	0,50	0,53	0,56	0,76	0,85	0,87	0,62	0,60	0,49	0,05	0,58	1,00	0,83	0,77	0,71
	YAK	0,69	0,64	0,30	0,72	0,86	0,81	0,62	0,64	0,29	0,26	0,62	0,83	1,00	0,73	0,48
	TAY	0,45	0,74	0,57	0,78	0,87	0,63	0,47	0,61	0,74	0,39	0,78	0,77	0,73	1,00	0,80
CWT	ALT	0,28	0,61	0,88	0,75	0,72	0,48	0,51	0,59	0,95	0,18	0,46	0,71	0,48	0,80	1,00

(б) 540 г. н. э.

Пара	метр		δ ¹⁸ Ο			δ ¹³ C			MXD			TRW			CWT	
		YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT
	YAK	1,00	0,17	-0,09	0,45	0,06	0,03	0,23	0,50	0,04	0,66	0,25	-0,13	0,67	0,43	0,09
δ ¹⁸ Ο	TAY	0,17	1,00	0,56	0,61	0,90	0,37	0,14	0,44	0,79	0,42	0,78	0,62	0,54	0,92	0,74
	ALT	-0,09	0,56	1,00	0,60	0,42	0,06	0,30	0,52	0,84	0,22	0,35	0,32	0,13	0,43	0,86
	YAK	0,45	0,61	0,60	1,00	0,49	0,19	0,59	0,43	0,66	0,80	0,61	0,33	0,68	0,72	0,73
	TAY	0,06	0,90	0,42	0,49	1,00	0,69	0,18	0,23	0,69	0,27	0,80	0,88	0,58	0,81	0,54
δ ¹³ C	ALT	0,03	0,37	0,06	0,19	0,69	1,00	0,35	-0,08	0,23	0,09	0,53	0,86	0,53	0,30	0,02
	YAK	0,23	0,14	0,30	0,59	0,18	0,35	1,00	0,08	0,30	0,55	0,33	0,20	0,47	0,28	0,35
	TAY	0,50	0,44	0,52	0,43	0,23	-0,08	0,08	1,00	0,62	0,45	0,15	0,00	0,33	0,48	0,65
MXD	ALT	0,04	0,79	0,84	0,66	0,69	0,23	0,30	0,62	1,00	0,39	0,46	0,54	0,35	0,69	0,95
	YAK	0,66	0,42	0,22	0,80	0,27	0,09	0,55	0,45	0,39	1,00	0,44	0,07	0,81	0,64	0,49
	TAY	0,25	0,78	0,35	0,61	0,80	0,53	0,33	0,15	0,46	0,44	1,00	0,60	0,70	0,85	0,44
TRW	ALT	-0,13	0,62	0,32	0,33	0,88	0,86	0,20	0,00	0,54	0,07	0,60	1,00	0,46	0,50	0,30
	YAK	0,67	0,54	0,13	0,68	0,58	0,53	0,47	0,33	0,35	0,81	0,70	0,46	1,00	0,75	0,29
	TAY	0,43	0,92	0,43	0,72	0,81	0,30	0,28	0,48	0,69	0,64	0,85	0,50	0,75	1,00	0,68
CWT	ALT	0,09	0,74	0,86	0,73	0,54	0,02	0,35	0,65	0,95	0,49	0,44	0,30	0,29	0,68	1,00

(в) 541 г. н. э.

Пара	метр		δ ¹⁸ Ο			$\delta^{13}C$			MXD			TRW			CWT	
		YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT
	YAK	1,00	0,22	0,05	0,60	0,13	0,15	0,36	0,43	0,18	0,73	0,14	-0,11	0,72	0,37	0,22
δ ¹⁸ Ο	TAY	0,22	1,00	0,51	0,54	0,90	0,29	0,10	0,48	0,75	0,45	0,73	0,55	0,53	0,89	0,71
	ALT	0,05	0,51	1,00	0,60	0,33	0,01	0,32	0,52	0,83	0,34	0,23	0,18	0,17	0,34	0,86
	YAK	0,60	0,54	0,60	1,00	0,38	0,18	0,62	0,38	0,63	0,90	0,40	0,15	0,72	0,56	0,72
	TAY	0,13	0,90	0,33	0,38	1,00	0,63	0,10	0,28	0,60	0,34	0,78	0,83	0,58	0,80	0,46
δ ¹³ C	ALT	0,15	0,29	0,01	0,18	0,63	1,00	0,35	-0,08	0,14	0,21	0,42	0,81	0,55	0,20	-0,04
	YAK	0,36	0,10	0,32	0,62	0,10	0,35	1,00	0,07	0,29	0,64	0,20	0,08	0,51	0,19	0,36
	TAY	0,43	0,48	0,52	0,38	0,28	-0,08	0,07	1,00	0,68	0,37	0,17	0,02	0,30	0,50	0,65
MXD	ALT	0,18	0,75	0,83	0,63	0,60	0,14	0,29	0,68	1,00	0,52	0,33	0,37	0,37	0,62	0,96
	YAK	0,73	0,45	0,34	0,90	0,34	0,21	0,64	0,37	0,52	1,00	0,30	0,09	0,85	0,55	0,58
	TAY	0,14	0,73	0,23	0,40	0,78	0,42	0,20	0,17	0,33	0,30	1,00	0,57	0,56	0,83	0,31
TRW	ALT	-0,11	0,55	0,18	0,15	0,83	0,81	0,08	0,02	0,37	0,09	0,57	1,00	0,42	0,44	0,16
	YAK	0,72	0,53	0,17	0,72	0,58	0,55	0,51	0,30	0,37	0,85	0,56	0,42	1,00	0,66	0,33
	TAY	0,37	0,89	0,34	0,56	0,80	0,20	0,19	0,50	0,62	0,55	0,83	0,44	0,66	1,00	0,60
CWT	ALT	0,22	0,71	0,86	0,72	0,46	-0,04	0,36	0,65	0,96	0,58	0,31	0,16	0,33	0,60	1,00

(г) 1257 г. н. э.

Пара	Параметр <u>δ¹⁸O</u> <u>ΥАК</u> ТА <u>Υ</u>				δ ¹³ C			MXD			TRW			CWT		
		YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT
	YAK	1	0,28	0,27	0,4	0,08	0,44	0,3	-0,2	0,34	0,42	0,68	0,48	-0,12	-0,12	0,31
δ ¹⁸ Ο	TAY	0,28	1	-0,18	-0,13	0,64	-0,28	-0,04	-0,05	-0,43	-0,03	0,4	-0,15	-0,22	-0,49	-0,43
	ALT	0,27	-0,18	1	0,28	-0,24	0,28	0,23	-0,2	0,25	0,23	0,04	0,39	-0,17	0,1	0,09
	YAK	0,4	-0,13	0,28	1	-0,03	0,53	0,25	-0,19	0,45	0,36	0,31	0,45	0,03	0,09	0,4
	TAY	0,08	0,64	-0,24	-0,03	1	-0,26	-0,13	0,09	-0,06	-0,14	0,28	0,13	0,02	0,07	-0,08
δ ¹³ C	ALT	0,44	-0,28	0,28	0,53	-0,26	1	0,08	-0,17	0,54	0,14	0,07	0,71	-0,1	0,14	0,38
	YAK	0,3	-0,04	0,23	0,25	-0,13	0,08	1	-0,03	0,17	0,92	0,16	0,06	-0,24	0,03	0,1
	TAY	-0,2	-0,05	-0,2	-0,19	0,09	-0,17	-0,03	1	0,2	0,07	0,06	-0,06	0,41	0,11	0,23
MXD	ALT	0,34	-0,43	0,25	0,45	-0,06	0,54	0,17	0,2	1	0,34	0,06	0,78	0,21	0,49	0,86
	YAK	0,42	-0,03	0,23	0,36	-0,14	0,14	0,92	0,07	0,34	1	0,29	0,15	-0,07	0,07	0,26
	TAY	0,68	0,4	0,04	0,31	0,28	0,07	0,16	0,06	0,06	0,29	1	0,12	-0,06	-0,06	0,06
TRW	ALT	0,48	-0,15	0,39	0,45	0,13	0,71	0,06	-0,06	0,78	0,15	0,12	1	0,04	0,48	0,62
	YAK	-0,12	-0,22	-0,17	0,03	0,02	-0,1	-0,24	0,41	0,21	-0,07	-0,06	0,04	1	0,3	0,14
	TAY	-0,12	-0,49	0,1	0,09	0,07	0,14	0,03	0,11	0,49	0,07	-0,06	0,48	0,3	1	0,4
CWT	ALT	0,31	-0,43	0,09	0,4	-0,08	0,38	0,1	0,23	0,86	0,26	0,06	0,62	0,14	0,4	1

(д) 1640 г. н. э.

Парам	етр		δ ¹⁸ Ο			δ ¹³ C			MXD			TRW			CWT	
		YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT
	YAK	1,00	-0,01	0,09	0,24	0,14	-0,26	0,12	0,46	0,39	0,34	0,19	0,29	0,35	0,20	-0,39
δ ¹⁸ Ο	TAY	-0,01	1,00	-0,02	0,15	0,62	0,15	0,29	-0,20	-0,10	-0,01	0,49	0,26	0,04	0,13	-0,09
	ALT	0,09	-0,02	1,00	0,10	0,04	0,63	-0,28	-0,06	0,03	0,03	0,33	-0,27	0,17	0,36	-0,27
	YAK	0,24	0,15	0,10	1,00	0,31	0,04	0,51	0,12	0,22	0,61	0,28	0,02	0,55	0,22	0,22
	TAY	0,14	0,62	0,04	0,31	1,00	-0,17	0,18	0,09	0,06	0,21	0,59	0,12	0,14	0,31	-0,10
δ ¹³ C	ALT	-0,26	0,15	0,63	0,04	-0,17	1,00	-0,27	-0,34	0,12	-0,25	0,06	-0,20	-0,03	0,04	-0,20
	YAK	0,12	0,29	-0,28	0,51	0,18	-0,27	1,00	-0,32	0,08	0,25	0,15	0,25	0,12	0,11	0,30
	TAY	0,46	-0,20	-0,06	0,12	0,09	-0,34	-0,32	1,00	0,04	0,15	0,02	-0,12	-0,05	-0,01	0,06
MXD	ALT	0,39	-0,10	0,03	0,22	0,06	0,12	0,08	0,04	1,00	0,19	0,09	0,54	0,26	0,19	0,10
	YAK	0,34	-0,01	0,03	0,61	0,21	-0,25	0,25	0,15	0,19	1,00	0,02	0,12	0,82	0,18	0,14
	TAY	0,19	0,49	0,33	0,28	0,59	0,06	0,15	0,02	0,09	0,02	1,00	0,28	0,15	0,83	-0,08
TRW	ALT	0,29	0,26	-0,27	0,02	0,12	-0,20	0,25	-0,12	0,54	0,12	0,28	1,00	0,26	0,29	0,15
	YAK	0,35	0,04	0,17	0,55	0,14	-0,03	0,12	-0,05	0,26	0,82	0,15	0,26	1,00	0,30	-0,02
	TAY	0,20	0,13	0,36	0,22	0,31	0,04	0,11	-0,01	0,19	0,18	0,83	0,29	0,30	1,00	0,02
CWT	ALT	-0,39	-0,09	-0,27	0,22	-0,10	-0,20	0,30	0,06	0,10	0,14	-0,08	0,15	-0,02	0,02	1,00

(е) 1815 г. н. э.

Парам	іетр		δ ¹⁸ Ο			δ ¹³ C			MXD			TRW			CWT	
		YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT
δ ¹⁸ Ο	YAK	1,00	0,17	-0,01	0,79	0,20	0,03	-0,33	-0,05	0,14	-0,13	-0,11	0,10	0,08	0,19	0,00
	TAY	0,17	1,00	-0,21	0,30	0,39	-0,19	0,08	0,14	0,00	-0,08	0,21	0,17	0,50	0,46	-0,01
	ALT	-0,01	-0,21	1,00	-0,05	0,14	0,19	-0,22	0,09	0,13	-0,11	-0,27	-0,17	-0,32	0,05	0,15
δ ¹³ C	YAK	0,79	0,30	-0,05	1,00	0,24	0,16	-0,18	0,04	-0,11	-0,17	-0,06	0,11	0,22	0,23	-0,21
	TAY	0,20	0,39	0,14	0,24	1,00	-0,61	-0,50	-0,14	-0,27	-0,45	-0,35	-0,40	-0,31	-0,07	-0,10
	ALT	0,03	-0,19	0,19	0,16	-0,61	1,00	0,44	0,30	0,22	0,24	0,27	0,49	0,17	0,25	0,07
MXD	YAK	-0,33	0,08	-0,22	-0,18	-0,50	0,44	1,00	0,55	0,36	0,25	0,50	0,54	0,28	0,22	0,17
	TAY	-0,05	0,14	0,09	0,04	-0,14	0,30	0,55	1,00	0,59	-0,12	0,76	0,53	0,05	0,59	0,59
	ALT	0,14	0,00	0,13	-0,11	-0,27	0,22	0,36	0,59	1,00	0,07	0,55	0,75	0,06	0,36	0,91
TRW	YAK	-0,13	-0,08	-0,11	-0,17	-0,45	0,24	0,25	-0,12	0,07	1,00	0,04	0,20	0,16	-0,01	-0,04
	TAY	-0,11	0,21	-0,27	-0,06	-0,35	0,27	0,50	0,76	0,55	0,04	1,00	0,60	0,25	0,39	0,54
	ALT	0,10	0,17	-0,17	0,11	-0,40	0,49	0,54	0,53	0,75	0,20	0,60	1,00	0,48	0,57	0,58
CWT	YAK	0,08	0,50	-0,32	0,22	-0,31	0,17	0,28	0,05	0,06	0,16	0,25	0,48	1,00	0,42	-0,11
	TAY	0,19	0,46	0,05	0,23	-0,07	0,25	0,22	0,59	0,36	-0,01	0,39	0,57	0,42	1,00	0,27
	ALT	0,00	-0,01	0,15	-0,21	-0,10	0,07	0,17	0,59	0,91	-0,04	0,54	0,58	-0,11	0,27	1,00

(ж) 1991 г. н. э.

Паран			δ ¹⁸ Ο			δ ¹³ C			MXD			TRW			CWT	
Парам	lerp	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT	YAK	TAY	ALT
	YAK	1,00	-0,36	0,50	0,48	-0,21	-0,37	0,48	-0,20	0,53	0,31	0,05	0,34	0,33	-0,16	0,01
δ ¹⁸ Ο	TAY	-0,36	1,00	-0,05	-0,31	0,08	0,18	-0,47	0,17	-0,12	-0,26	0,25	0,00	-0,49	-0,15	-0,51
	ALT	0,50	-0,05	1,00	0,41	-0,12	-0,06	0,24	0,17	0,74	-0,11	0,09	0,60	0,14	0,08	0,40
	YAK	0,48	-0,31	0,41	1,00	0,01	0,05	0,56	0,18	0,19	0,06	0,14	0,34	0,23	0,14	0,38
	TAY	-0,21	0,08	-0,12	0,01	1,00	0,93	-0,31	0,38	0,04	-0,19	0,05	0,47	-0,12	0,21	0,04
δ ¹³ C	ALT	-0,37	0,18	-0,06	0,05	0,93	1,00	-0,23	0,49	-0,07	-0,19	0,13	0,43	-0,11	0,30	0,03
	YAK	0,48	-0,47	0,24	0,56	-0,31	-0,23	1,00	-0,13	0,09	0,58	-0,22	0,01	0,80	0,03	0,02
	TAY	-0,20	0,17	0,17	0,18	0,38	0,49	-0,13	1,00	0,22	-0,28	0,75	0,57	-0,07	0,03	0,04
MXD	ALT	0,53	-0,12	0,74	0,19	0,04	-0,07	0,09	0,22	1,00	-0,17	0,04	0,67	0,26	-0,05	0,34
	YAK	0,31	-0,26	-0,11	0,06	-0,19	-0,19	0,58	-0,28	-0,17	1,00	-0,24	-0,37	0,42	0,17	-0,25
	TAY	0,05	0,25	0,09	0,14	0,05	0,13	-0,22	0,75	0,04	-0,24	1,00	0,37	-0,29	-0,11	-0,26
TRW	ALT	0,34	0,00	0,60	0,34	0,47	0,43	0,01	0,57	0,67	-0,37	0,37	1,00	0,10	0,03	0,30
	YAK	0,33	-0,49	0,14	0,23	-0,12	-0,11	0,80	-0,07	0,26	0,42	-0,29	0,10	1,00	-0,05	0,01
	TAY	-0,16	-0,15	0,08	0,14	0,21	0,30	0,03	0,03	-0,05	0,17	-0,11	0,03	-0,05	1,00	0,48
CWT	ALT	0,01	-0,51	0,40	0,38	0,04	0,03	0,02	0,04	0,34	-0,25	-0,26	0,30	0,01	0,48	1,00

Черным жирным цветом выделены значимые данные *p*<0,05.