

DOI 10.17516/1997-1389-0313

УДК 581.526.426.2

Эколого-физиологическая реакция хвойных  
деревьев из высокоширотных и низкоширотных регионов  
Евразии на стратосферные вулканические извержения

Чуракова Ольга Васильевна (Сидорова)а,б,в\*, Фонтя Марина Владимировна,в,  
Кирдянова Александра Васильевна,д,д, Мыглана Владимир Сергеевич ,  
Валентина Владимировна Баринава, Свидерская Ирина ВладимировнаНаумова Оксана Владимировнаа  
Дмитрий В. Овчинников, Александр В. Шашкин, Матиас Саурерк,ф, Патрик Фонтик  
Себастьян Гийеб, Кристоф Коронаг ,  
Ирина П. Панюшкина, Ульф Бюнтгенс,е, Малкольм К. Хьюгеш, Рольф  
Т. В. Зигвольфс,ф, Маркус Штоффельб и Евгений А. Ваганова,д а Сибирский  
федеральный университет  
Красноярск, Российская Федерация  
б Женевский университет  
Женева, Швейцария с  
Швейцарский федеральный научно-  
исследовательский институт  
леса, снега и ландшафта WSL  
Бирменсдорф, Швейцария d Институт  
леса им. В.Н. Сукачева СО РАН ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»  
Красноярск, Российская Федерация е  
Кембриджский университет  
Кембридж, Англия f  
Институт Пауля Шеррера в  
Филлигене – PSI, Швейцария  
g Университет Блеза Паскаля  
в Клермон-Ферране, Франция  
и Университет Аризоны в  
Тусоне, США

Получено 22.01.2019, получено в доработанном виде 22.04.2019, принято 15.07.2019

© Сибирский федеральный университет. Все права защищены. Данная работа распространяется по лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0).

\* Адрес электронной почты ответственного автора: ochurakova@sfu-kras.ru

ORCID: 0000-0002-1687-1201 (Чуракова О.); 0000-0002-2415-8019 (Фонти М.); 0000-0002-3954-3534 (Заурер М.); 0000-0002-7645-6157 (Корона Ч.); 0000-0002-7070-3292 (Фонти П.); 0000-0002-5268-653X (Мыглан В.); 0000-0002-6797-4964 (Кирдянов А.); 0000-0001-8854-2637 (Панюшкина И.); 0000-0002-3821-0818 (Понтоген У.); 0000-0003-1062-3167 (Хьюз М.); 0000-0001-9168-1152 (Ваганов Е.); 0000-0002-0249-0651 (Зигольф М.)

Аннотация. Стратосферные вулканические извержения оказали значительное влияние на радиационный баланс, температуру атмосферы и поверхности, осадки и региональные погодные условия, что привело к глобальным климатическим изменениям. Изменения, связанные с такими извержениями, чаще всего приводят к похолоданию в течение нескольких лет после событий. Целью данного исследования было выявить экофизиологическую реакцию лиственниц из северо-восточной Якутии (YAK), восточного Таймыра (TAY) и Алтая (ALT) на климатические аномалии после крупных вулканических извержений CE 535, 540, 1257, 1641, 1815 и 1991 гг. с использованием новых множественных параметров годовых колец: ширина годового кольца (TRW), максимальная плотность поздней древесины (MXD), толщина клеточной стенки (CWT),  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  в целлюлозе годовых колец. Это исследование показало, что хронологии TRW, CWT, MXD и  $\delta^{18}O$  регистрировали температурный сигнал, в то время как информация об осадках и дефиците давления пара была получена хронологиями  $\delta^{13}C$ . Продолжительность солнечного сияния была хорошо зарегистрирована в  $\delta^{18}O$  от YAK и ALT. Параметры годовых колец регистрировали холодные, влажные и облачные летние аномалии в течение 6-го и 13-го числа

столетия. Однако существенные летние аномалии после извержений Тамборы (1815) и Пинатубо (1991) не были зафиксированы ни одним параметром годовых колец.

Ключевые слова:  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  в целлюлозе годовых колец, ширина годовых колец, максимальная плотность поздней древесины, толщина клеточной стенки, температура воздуха, осадки, продолжительность солнечного сияния, дефицит давления пара.

---

Цитирование: Чуракова (Сидорова) О.В., Фонти М.В., Кирдянов А.В., Мыглан В.С., Баринев В.В., Сви́дeрская И.В., Наумова О.В., Овчинников Д.В., Шашкин А., Заурер М., Гийе С., Корона С., Фонти П., Панюшкина И., Бюнтген У., Хьюз М.К., Зигвольф Р.Т.В., Стоффель М., Ваганов Е.А. Экофизиологическая реакция хвойных пород высокогорных и высокогорных регионов Евразии на стратосферные извержения вулканов. Ж. Сиб. Фед. унив. биол., 2020, 13(1), 5-24. DOI: 10.17516/1997-1389-0313.

---

## Экофизиологический отклик двойных из высокоширотных и высоких районов Евразии на стратосферные извержения вулканов

О.В. Чуракова (Сидорова)<sup>а,б,в</sup>, М.В. Фонтин<sup>в</sup>, А.В. Кирдянова<sup>г,д</sup>, В.В. Барина<sup>в</sup>,  
В.С.Мыглана<sup>в</sup>, И.В. Свидерская<sup>в</sup>, О.В. Наумова<sup>в</sup>, А.В. Шашкин<sup>г</sup>,  
Д.В.Овчинников<sup>г</sup>, М. Саурер<sup>в,е</sup>, С. Гулеб<sup>в</sup>,  
К. Коронаж<sup>в</sup>, П. Фонтин<sup>в</sup>, I.P.Панюшкина<sup>з</sup>, У. Бюнтген<sup>д</sup>,  
М.К.Хьюз<sup>ж</sup>, Р. Т.В. Сигвольф<sup>в,е</sup>, М. Стоффель<sup>б</sup>, Е.А. Ваганова<sup>г</sup>  
Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск  
<sup>б</sup>Университет Женевы  
Швейцария, Женева  
в Швейцарском федеральном институте леса, снега и ландшафта  
Швейцария, Бирменсдорф  
г Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН  
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»  
Российская Федерация, Красноярск  
<sup>д</sup>Кембриджский университет  
Англия, Кембридж  
и Институт Паули Шеррера  
Швейцария, Филлиген – PSI  
жУниверситет Блеза Паскаля  
Франция, Клемон-Ферран  
в Университете Аризоны  
США, Тусон

Аннотация. Стратосферные вулканические извержения вызывают значительные изменения радиационного баланса, атмосферных температур и региональных погодных условий, которые, в свою очередь, влияют на состояние глобальной циркуляции атмосферы. Эти изменения, связанные с такими извержениями, в большинстве случаев приводят к глобальному похолоданию в течение нескольких лет после событий. Целью исследования стало возникновение экофизиологического отклика лиственницы на северо-востоке Якутии (YAK), восточном Таймыре (TAY) и Алтае (ALT) на климатические аномалии, вызванные мощными вулканическими извержениями 535, 540, 1257, 1640, 1815 и 1991 годов.

н.э. с использованием разных параметров годичных колец: ширина годичного кольца (TRW), максимальный светильник последней древесины (MXD), капиллярной клеточной стенки (CWT), расположение стабильных изотопов вокруг и кислорода ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  и  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) в целлюлозе годового кольца. Настоящее исследование показало, что хронологии TRW, CWT, MXD и  $\delta^{18}\text{O}$ -хронологии содержат температурный сигнал, в то время как информация об осадках и дефиците упругости водяного пара фиксируется в хронологиях  $\delta^{13}\text{C}$ . Информация о продолжительности солнечного излучения хорошо отразилась в хронологии  $\delta^{18}\text{O}$  регионов ЯК.

и АЛТ. Параметры годовичных колец деревьев зафиксировали информацию о холодных, влажных и облачных аномалиях летнего сезона в течение VI и XIII вв. Однако аномалий погодных условий условий в Сибири в летний период после извержений Тамбора (1815 г.) и Пинатубо (1991 г.) исходя из параметров годовичных колец выявлено не было.

Ключевые слова:  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе, ширина годового кольца, верхний потолок последней древесины, крышка клеточной стенки, температура воздуха, осадка, продолжительность солнечного сияния, дефицит упругости водяного пара.

Цитирование: Чуракова (Сидорова), О.В. Экофизиологический отклик двойных из высокоширотных и высоких районов Евразии на стратосферные извержения вулканов / О.В. Чуракова (Сидорова), М.В. Фонти, А.В. Кирдянов, В.С. Мыглан, В.В. Баринов, И.В. Свидерская, О.В. Наумова, Д.В. Овчинников, А.В. Шашкин, М. Саурер, С. Гуле, К. Корона, П. Фонти, И.П. Панюшкина, У. Бюнтген, М.К. Хьюс, Р. Т.В. Сигвольф, М. Стоффель, Е.А. Ваганов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2020. 13(1). С. 5-24. DOI: 10.17516/1997-1389-0313

## Введение

Глобальные климатические изменения, связанных с вулканическими извержениями, чаще всего приводят к понижению температуры температура приземного слоя атмосферы составляет 0,6–1,3 °C в течение нескольких лет после события (Robock, 2000). В результате мощных стратосферных вулканических извержений (VEI 4) продукты извержения (в частности, SO<sub>4</sub> 2-) остаются в стратосфере, где могут оставаться несколько лет. Длительное нахождение в стратосфере пылевой завесы приводит к уменьшению солнечной радиации, «блокированию» глобальной атмосферной циркуляции (Робок, 2000). В то же время по данным климатических моделей в Европе и Сибири было выявлено снижение количества атмосферных выбросов после мощных стратосферных извержений (Robock, Liu, 1994; Iles, Hegerl, 2014; Wegmann et al., 2014; Gillett et al., 2004). Более того, стратосферные извержения вулканов также могут

Архивные исторические документы могут содержать ценную информацию об извержениях вулканов и последствий климата таких изменений (Стотерс, 2000). Кроме того, анализ содержания частиц пыли и кислоты в слоях ледниковых ядер дают возможность для точной датировки вулканических извержений и описания их воздействия на климат (Zielinski et al., 1994). Точные календарные датировки годовичных колец деревьев какую прочную основу для их использования в качестве палеоклиматических архивов, содержащих информацию о мощных вулканических извержениях (LaMarche, Hirschboeck, 1984; Lough, Fritts, 1987; Briffa et al., 1998; Hughes et al., 1999; D'Arrigo et al., 2001; Кракауэр, Рандерсон, 2003; Сидорова и др., 2005; Зальцер, Хьюз, 2007; Чуракова (Сидорова) и др., 2014, 2016, 2019; Баринов и др., 2018).

приехать к зимнему потеплению на север на всех континентах (Келли и др., 1996; Робок, Мао, 1992) являются причиной положительной фазы арктической (АО) и Северо-Атлантической (САК) циркуляции (Гройсман, 1992; Робок, Мао, 1992).

Уникальным архивом данных о ежегодном изменении климата, в том числе климатических аномалий, это структура годовичных колец деревьев (Schweingruber, 1996). Изменения глубины плотности годовичных колец, а также их анатомические параметры, например толщина клеточной стенки, содержит информацию об

изменения климата, вызванные мощностью стратосферными вулканическими извержениями. Интерпретация этой информации основана на том факте, что ширина и плотность годовичных колец деревьев, произрастающих вблизи полярной или верхней границы леса, содержат важную информацию об изменчивости летней температуры воздуха, что показано в обширных исследованиях (Фриттс, 1976; Швайнгрубер, 1996; Хьюз и др., 1999; Ваганов и др., 2006). Заметно меньшее внимание уделялось тому, как элементный и изотопный состав древесных годовичных колец менялся в те периоды, когда они могли подвергаться влиянию удаленных вулканических извержений. Тем не менее в нескольких исследованиях установлено, что по элементному составу годовичных колец возможно выявить отклик деревьев как на локальные, так и пространственно удаленные извержения (Пирсон и др., 2009). Стоит также отметить, что в некоторых исследованиях используют изотопные сигналы в годовичных кольцах. На всей территории средней широты (Баттипалья и др., 2007) и субарктических районах Канады (Дженнаретти и др., 2017) также было выявлено влияние извержений вулканов.

Исследование отклика деревьев на деревьях женщины, произрастающие в высокоширотных и Высокие районы Евразии, на мощных стратосферных вулканических извержениях с привлечением многопараметрического подхода, используя данные по широте годовичных колец деревьев (TRW), высокой плотности поздней древесины (MXD), толсто-неклеточной стенки трахеида (CWT), соотношению стабильных изотопов ( $\delta^{13}\text{C}$ ) и кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в целлюлозе-летних колец является основанием для российского, так и для международного уровня (Чуракова (Сидорова) и др., 2014; 2019). данный подход

с использованием нескольких параметров

древесный колец позволит нам прогрессировать знания и понимание соблюдения климата и условия окружающей среды после мощных вулканических извержений. Сравнение климатический сигнал между параметрами годовичного кольца и изотопной композиции молока и кислород в целлюлозе годовичных колец деревьев лиственниц, произрастающих в высокоширотных и высоких регионах Евразии дайте возможность выявить вариации. ту во времени, долговечность вулканические события, их мощность, а также излучают любой сигнал индивидуальности, зафиксированный деревьями для этих районов исследования.

#### Материалы и методы исследования

О возникновении ранее построенных времен в древесно-кольцевых хронологиях для северо-востока Якутии (ЯК) (Хьюз и др., 1999; Сидорова, Наурзбаев, 2002), востока Таймыра (ТАУ) (Наурзбаев и др., 2002) и Алтая (АЛТ) (Мыглан и др., 2008), были выбраны периоды, характерные дружелюбным вулканическая активность с известными и неизвестными стратосферными вулканическими извержениями: 516-560, 1242-1286, 1625-1675, 1790-1835 и 1950-2000 гг. н.э. (табл. 1).

Были измерены и проанализированы основные выступы поздней древесины (MXD), капилляры клеточной стенки трахеида (CWT), направление стабильных изотопов поворота ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) и кровотока ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) в целлюлозе годовичных колец деревьев. Репликация образцов для каждого из параметров годовичного кольца включена и качественно подтверждена в ранее опубликованных работах (Loader et al., 1997; Панюшкина и др., 2003; Сидорова и др., 2008, 2010).

Данные MXD за период с 1407 по 2007 г. н.э. по АЛТ взяты из публикаций Шнайдера и соавторов (Schneider et al., 2015), а

Таблица 1. Стратосферные вулканические извержения за последние 1500 лет, исследованные в данной работе

Таблица 1. Сводка стратосферных вулканических извержений за последние 1500 лет, исследованных в этом исследовании.

Год/месяц/день извержения	Название вулкан	Индекс вулканической деятельности (ВЭИ)	Optical глубина, т	Координаты	Литература
535/??	Неизвестно	6+?	?	Неизвестно	Стозерс, 1984а, 1999
540/??	Неизвестно	?	?	Неизвестно	Сигл и др., 2013, 2015; Тухи, Сигл, 2017
1257/09/?	Самалас	7	0,39	Индонезия	Сотерс, 2000; Сигл и др., 2015
1640/12/?	Parker	5	0,18	Филлипины, 6° с. ш., 124° в. д.	Зелински и др., 1994
1815/04/10	Tambora	7	0,20	Индонезия, 8° ю. ш., 118° в. д.	Стозерс, 1984б; Зелински и др., 1994
1991/06/12	Пинатубо	6	0,12	Филлипины, 15° с. ш., 120° в. д.	Зелински и др., 1994; Сигл и др., 2015 г.

для ЯК с 1790 по 2004 г.в. – из работ Сидоровой и соавторов (Сидорова и др., 2010). За другие периоды были проведены измерения плотности древесины как минимум шесть образцы (Швайнгрубер, 1996). За период с 520 по 560 г. н.э. было использовано только четыре образца, так же как и в остальных образцах колец 536 и 537 г. н.э. отсутствовали. Измерения большей плотности годовичных колец технологии в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН и Швейцарском Институте снега, леса и ландшафта по широко апробированной методике, подробно описанной Швайнгрубером в 1996 г. (Швайнгрубер, 1996).

Данные по толщине клеточной стенки трахеида (CWT) для АЛТ в периоды с 1790 г. по 1835 и с 1950 по 2000 г. н.э. были взяты из ранее опубликованных исследований (Сидорова и др., 2012; Фонти и др., 2013) и для ЯК в период с 1600 по 1980 г. н.э. – данные, опубликованные Панюшкиной с соавторами (Панюшкина и др., 2003). Получение клеточных хронологий (n = 4) для других периодов и их анализ были проведены в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН.

Анализ изотопного соотношения углекислого газа ( $^{13}\text{S}/^{12}\text{C}$ ) и кислорода ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) или измерения ( $\delta^{13}\text{S}$ ) и ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в целлюлозе-летних колец деревьев был проведен в Институте Паули Шеррера (PSI, Швейцария) для всех периодов исследований (Сидорова и др., 2008, 2010, 2012, 2013; (Сидорова и др., 2014). Для каждого периода исследования было использовано четыре древесных образца (6-8 фрагментов древесного диска).

При анализе состояния древесных колец для изменения условий роста после вулканических извержений был использован метод наложенных эпох ( $\pm 15$  лет до и после извержений) (Панофски, Брайер, 1958). Он был применен для всех параметров годовичного кольца и для каждого вулканического извержения (535, 1257, 1640, 1815, 1991 гг.) для северо-востока Якутии (YAK), востока Таймыра (TAY) и Алтая (ALT). Все вычисления выполняются в программе R Core Team 2016 (R Core Team, 2016).

С учетом климатических факторов, определяющих изменчивость того или иного древесно-кольцевого параметра были рассчитаны коэффициенты корреляции с климатом.

Таблица 2. Характеристики прибрежных районов и местных метеорологических исследований

Таблица 2. Статистика местоположений исследовательских площадок и метеостанций

Координаты	Виды	Метеостанция	Период рассмотрения				Амплитудный период	Буровая глубина, см	Буровая глубина	Среднегодовой дождливости
			Температура	Осадки	Солнечное излучение	Ветер				
ЯК	Ларикс Каяндери Майр.	Чокурдах 62° с.ш. 147° в.д. 61 м над у.м.	1950-2000	1966-2000	1961-2000	1950-2000	90**	40-60**	-13,2	269
ТАИ	Ларикс гмелина Рупр.	Хатанга 71° с.ш. 102° в.д. 33 м над у.м.	1950-2000	1966-2000	1961-2000	1950-2000	90**	40-60**	-13,2	269
АЛТ	Ларикс сибирика Ледеб.	Мугур-Аксы 50° с.ш. 90° в.д. 1850 м над у.м.	1963-2000	1966-2000	н.д.	н.д.	90-120***	80-100***	-2,7	153

Примечание: \*Абаимов и др., 1997; Хьюз и др., 1999; Чуракова (Сидорова) и др., 2016; \*\*Наурзбаев и др., 2002; \*\*\*Сидорова и др., 2012.

тическими данными (табл. 2), полученными с помощью метеорологических исследований. При в расчетах использованы методы вероятностных распределенные, основанные на множественной генерации выборок методом Монте-Карло, на базе предлагаются выборки.

Результаты и обсуждение  
Аномалии, зафиксированные параметрами годовых колец деревьев и стабильными изотопами после вулканических извержений

В результате анализа использовано-ем методом наложенных эпох установлено, что важные изменения параметров колец на-Изменения в хронологии произошли по толщине клеточной стенки трахеида. На деревьях лиственницы, росшие в Якутии и на Таймыре, эти изменения произошли сразу же после извержений, а на Алтае – двумя годами позже (рис. 1). В Якутии величины со-отношения изотопов кислорода (δ18O) в цел-

люлозе годичный колец равен умень-шалась в первый год после извержений, тогда как на деревьях на полуострове Таймыр и в гор-ном Алтае – в течение двух лет. Изменения δ13C и δ18O в целлюлозе-летних. колец в 536 г. н.э. немедленно посылать сообщения после извержения и не иметь ресурсов за по-после 1500 лет.

Стратосферные извержения вулкана 535 и 541 гг. н.э.

Исследования, направленные на понимание зафиксированных в годовых кольцах мест последствий извержений вулканов, проводимые с использованием нескольких параметры древесных колец, особенно необходимы, так как годовые кольца в виде деревьев позволить с уверенностью до года определить календарные даты, что затруднительно для другие палеоклиматические терминальные ис-точников информации (ледниковые и озерные керны или споро-пыльцевые спектры). Мно-

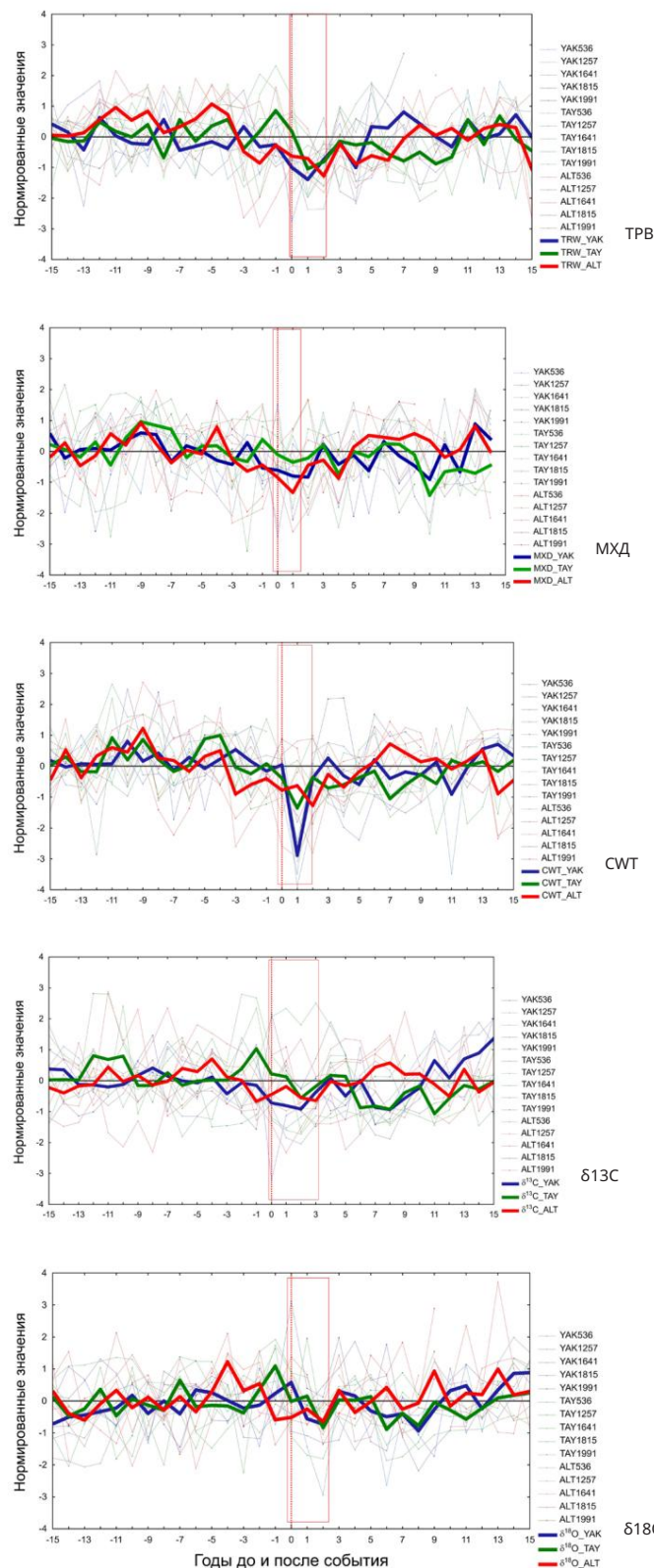


Рис. 1. Нормированные значения (z-score) для параметров годичного кольца (TRW, MXD, CWT,  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$ ) для каждого вулканического извержения (536 г., 1257 г., 1641 г., 1815 г., 1991 г.), расчетные

методом наложенных эпох ( $\pm 15$  лет до и после извержения – условно 0) для северо-востока Якутии (YAK, синяя линия), востока Таймыра (TAY, зеленая линия) и Алтай (ALT, линия). Периоды красных событий

пост-вулканические изображения контурами.

Рис. 1. Z-оценка параметров годичных колец для вулканических извержений: 536, 1257, 1641, 1815 и 1991 гг. н.э., рассчитанная с помощью анализа наложенных эпох ( $\pm 15$  лет до и после события – относительно нуля) для северо-восточной Якутии (YAK, синяя линия), восточного Таймыра (TAY, зеленая линия) и Алтая (ALT, красная линия). Поствулканические периоды отмечены прямоугольниками.



гие работы посвящены исследованию пылевой завесы 536 г. н.э., появившаяся вследствие неизвестного события (Baillie, 1994; Zielinski et al., 1994; Briffa et al., 1998; Stothers, 1999; D'Arrigo et al., 2001; Rigby et al., 2004). Это один из самых холодных периодов в Северном полушарии за последние два тысячелетия, по данным древесно-кольцевых хронологий и исторические источники (Stothers, 1999; Briffa et al., 1998; Larsen et al., 2008; Чуракова (Сидорова) и др., 2014; Büntgen et al., 2016).

Химический анализ ледниковых кернов Гренландии указывает на увеличение сульфатов в 535 г. н.э. (Пламмер и др., 2012). Предполагается, что сухие вулканические туманное множество и равномерно распределенные частицы пыли в атмосфере, порожденные событиями 530-540-х гг., в результате извержений 536 и 541 гг. н.э., приводящая к охлаждению приземного слоя атмосферы, задерживая солнечный свет и нарушая характер атмосферной циркуляции. Исторические документы дают информацию об эпидемиологической ситуации.

последствиях этих президентских вулканических туманов новейших наблюдений в Европе и на Востоке (Stothers, 1999). Данные, полученные из исторических документов, согласуются с данными о деревянных кольцах и размерах кислотности полярного льда (Stothers, 1999; Larsen et al., 2008; Guillet et al., 2017). Стоверс (Stothers, 1999) приписал эти события «неизвестному» вулкану, извержение которого, как считается, произошло в марте 536 г. где-то в северных широтах. В европейских хронологиях

на деревьях наблюдается замедление роста деревьев в течение наименьших 10 лет после событий 536 г. (Stothers, 1999; Baillie, 1994; Büntgen et al., 2016). гипотеза Альтернатива за исключением того, что вторжение окружающей среды (астероид или комета) в атмосфере могло стать причиной климатических изменений

в это время (Ригби и др., 2004). Полученная ранее хронология по содержанию сульфатов в ледниковом керне Гренландии имеет пробел в этот период и показывает увеличение концентрации только в предпоследнем 529 г.

(Зелински и др., 1994). Однако недавние исследования изменения (Гао и др., 2008; Ларсен и др., 2008; Сигл и др., 2015) большая константа вулканической серной кислоты в ледниковых ядрах Гренландии и Антарктики для события 536 г., что поддерживает исходную гипотезу извержения вулканов. Современные кислотность в ледниковых ядрах из Гренландии и Антарктики указывают, что за несколько лет до 536 г. произошло два или, возможно, даже три вулканических извержения (Плуммер и др., 2012; Сигл и др., 2015).

В частности, Сигл с соавторами (Sigl et al., 2013), анализируя ледниковые ядра, выявили несколько событий в Антарктиде/Гренландии (528,7/529,8; 531,2/532,5; 530,2). /531,5 и 534,6/535,0), что свидетельствует о глобальном характере климата этой серии извержений. В верхних рядах можно увидеть более высокое расположение вулканического сульфата в Гренландии по сравнению с Антарктидой. Обозначены их «извержениями, произошедшими в 532 и 536 гг.», сравниваемые с событиями, зафиксированными параметрами годовых колец, с целью календарного датирования вулканического извержения. Сигл и соавторы (Sigl et al., 2013) также сообщают о третьем событии с развитием осаждения вулканического сульфата, признаки которого присутствуют только в ледниковом ядре из Гренландии, начиная с 539,5 и заканчивая 541 г. н.э. Мы будем называть это «извержением 541 г.», также

сделать предварительную ссылку на данные, полученные для высокоширотных районов Евразии (Шуракова (Сидорова) и др., 2014). Очевидные улучшения в датировке ледниковых кернов (Ларсен и др., 2008; Пламмер и др.,

2012 г.; Сигл и др., 2013, 2015) и точности хронологии по осаждению вулканической серы и, следовательно, вулканических лет, сохраняются пересмотреть роль так называемого-го глобальных катастрофических событий 536 г. н.э. Третье извержение, по-видимому, закончилось пять лет спустя, в 541 г. н.э.

Предполагается, что кластер вулканических событий, центрированный в 536 г. н.э., приводит к замедлению радиального роста деревьев из-за совместного общего таких факторов-уровень, как уменьшение солнечного излучения, снижение температуры и снижение упругости водяного пара для высокоширотных (Якутия, Таймыр) и высоких (Алтай) районов Евразии.

При использовании древесно-кольцевых хронологий (TRW), электронных сигналов для YAK, TAY и ALT, был выбран период с 520 по 560 г. и проанализирован по другим параметрам: большей плотности поздней древесины, глубине клеточной стенки трахеида и стабильных изотопов органов дыхания и дыхания (рис. 1). Во время процедуры повторного датирования было установлено, что в большинстве образцов YAK и TAY отсутствовало кольцо 536 г. Четыре древних образца YAK, которые имели узкое кольцо 536 г., были использованы в анализе для построения хронологии по TRW и толстостенной клеточной стенки, а также полу-

значения данных по соотношению стабильных изотопов вынесено и отравлено. Для YAK и TAY наблюдаются отклонения ( $-2\sigma$ ) относительно-прироста деревьев среднего значения (TRW) для 536 и 541 гг. н.э. Хронология TRW для ALT имеет относительно широкое кольцо (до 0,90 мм) в начале периода. После 532 г. TRW для ALT резко снизился до  $-0,40$  мм и снова после 536 г. до 0,16 мм с наименьшим значением в 539 г. ( $-1,9\sigma$ ). Хронология TRW для ALT показывает выраженное снижение радиального роста в течение 24 лет по сравнению с TRW для TAY (17 лет) и YAK (11 лет) (рис. 1).

Фотографии образцов с повреждениями клеточными структурами в кольце 536 г. представлены на рис. 2. К сожалению, события распределения сегментов потоков с полуострова Таймыр, которые не использовались для анализа стабильных изотопов, были повреждены во время транспортировки. Таким образом, получить четкое изображение кольца 536 г. было невозможно. В результате данные о нарушающих структурах составили 536 г. для деревьев с участка TAY отсутствуют. В образцах из YAK и ALT хорошие циклы очень узкие кольца, состоящие из одно-четырех клеток в радиальном файле, и характерные нарушения в клеточной стадии, так называемые морозобойные кольца, связанные с вулканическим извержением 535 г. н.э. (рис. 2). Ана-

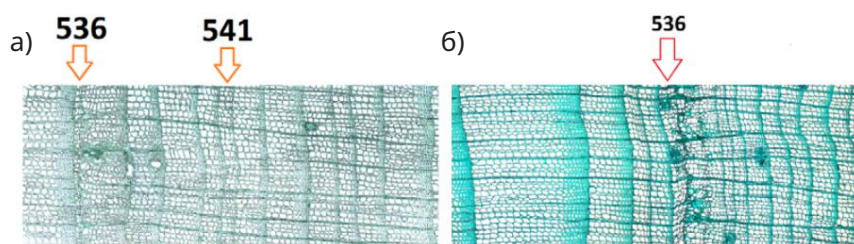


Рис. 2. Фотографии анатомических срезов древесины за 536 и 541 гг. н.э. для северо-востока Якутии (YAK) (а) и Алтая (ALT) (б)

Рис. 2. Анатомические микросрезы за 536 и 541 гг. н. э. из северо-восточной Якутии (YAK) (а) и Алтая (ALT) (б)

лиз изображений анатомической структуры годовичные кольца показали, что деревья значительно реагируют на экстремально холодные климатические условия, образующие лишь две клетки в вегетационный период, в ЯК (рис. 2а), или образующие морозобойные кольца, как в выборках лиственницы сибирской АЛТ (рис. 2б).

Хронология CWT была построена на основе анализа четырех примеров исследований в каждой области. В образцах, видимых на участке ЯК, CWT показывает снижение (до  $-2,1 \sigma$ ) в 536 и 541 гг., в то время время как среднее квадратическое отклонение для CWT у образцов в районе АЛТ составило  $-2,9 \sigma$ . Хронология CWT не выявила увеличения глубины клеточных стенок до 541 г. На участок АЛТ зарегистрированы самые низкие средние, минимальные и максимальные значения глубины клеточных стенок за период 520-560 гг. н.э. (и, в частности, для 536 г. н.э.).

Значения  $\delta^{13}C$  в целлюлозных участках YAK и TAY демонстрируют инновационное снижение в 536 г. ( $-3,3$  и  $-1,7 \sigma$  соответственно). Значения  $\delta^{13}C$  для участка ЯК показывает дальнейшее снижение и в 537 г. н.э. с небольшим провалом в 541 г. Значения  $\delta^{13}C$  для участка TAY производятся на низком уровне более десяти лет с минимумом в 538 г. н.э. Хронологии  $\delta^{13}C$ , полученные для всех трех участков ЯК, ТАЙ и АЛТ, установили разницу в средних значениях до 2,6 ‰. Аномально низкие значения соотношения изотопов кислорода  $\delta^{18}O$  для 536 г. н.э. регистры выросли на высоком Алтае (АЛТ) с разностью 8 ‰ и стандартным отклонением  $-4,8 \sigma$  относительно среднего значения для периода с 516-560 гг. н.э. (рис. 1). Низкие значения были обнаружены и для других исследований в окрестностях, включая участок TAY ( $-1,9 \sigma$ ) и YAK ( $-1,7 \sigma$ ).

Все параметры деревянного кольца для участок YAK, TAY и АЛТ достоверно кор-

соотносят друг с другом ( $r = 0,7-0,9$ ;  $p < 0,01$ ). Большинство из них продемонстрировали обеспечить связанность между частями-Ками, удаленными на расстоянии от 1400 до 3500 км друг от друга, что свидетельствует о глобальном характере событий, проявившемся на территории масштабного региона Сибири в 536 г. н.э.

Стратосферное извержение вулкана Самалас в 1257 г. н.э.

Извержение вулкана Самалас произошло в Индонезии в 1257 г. (Stothers, 2000; Lavigne et al., 2013; Guillet et al., 2017).

с осаждением серы в ледниковых кернах в концентрации, в два раза превышающих значения, зарегистрированные при извержении вулкана Тамборы в 1815 г. (Сигл и др., 2015). Анализ стратиграфии и отложений в ледниковых кернах Гренландии подтверждает активность извержения вулкана Самалас (индекс вулканической активности VEI = 7) с выбросом магмы  $40 \text{ км}^3$  (Лавин и др., 2013). Более того, климатический отклик на событие Камалас активно обсуждался подход для включения в климатические модели поколения GCM-CMIP6 (Stoffel et al., 2015). По данным обобщенных древесно-кольцевых хронологий для Северного полушария было выявлено, что 1258 и 1259 гг. н.э. были сами-ми холодными годами прошлого тысячелетия (Сидорова и др., 2005; Стоффель и др., 2015). Сообщается, что извержение вулкана Самалас обострило социально-экономический кризис в Японии и Англии (Guillet et al., 2017). Однако похолодание в Северном полушарии было пространственно-неоднородным. Предположено, что в Северной Америке климатические модули были установлены Эль-Ниньо и Южными осцилляциями. Однако в Сибирских хронологиях

извержение отразилось в снижении прироста в 1258 г. для ЯК и АЛТ и в 1259 г. для ТАЙ (рис. 1). В хронике Надима, построенной наологии северной экономики Сибири, также наблюдается сильное снижение прироста и возникновение аномальных структур годовичных колец в 1259 г. (Омурова и др., 2018).

Стратосферные извержения вулканов XVII, XIX и XX столетий н.э.

Исторические и природно-климатические архивы зарегистрированы в 1640 г. мощное извержение вулкана Паркер (табл. 1). В сибирских хронологиях данное событие произошло на два года позже, в 1642 г. (рис. 1).

Извержение вулкана Тамбора в 1815 г. н.э., приведу к так называемому году без лета, посвященному большому числу исследований. По историческим данным, вул-Тамбора стала причиной низкого урожая и эпидемий, повлекших за собой гибель более 200 000 человек во всем мире (Brönnimann, Krämer, 2016). Модели атмосферной цирку-

ляции уменьшения количества капли в 1816 г. в варианте Северной Америки, восточной, центральной и западной частей Азии. Климатические реконструкции демонстрируют холодное и дождливое лето на западной части Европы.

Клеточная хронология деревьев из Якутии зафиксировала извержение Тамборы уже в поездке колец 1816 г. Заметное изменение изотопного состава заключена в целлюлозу дерева в горах Алтая отметка на год позже, в 1817 г. н.э. (рис. 1).

Стратосферное извержение вулкана Пинатубо в 1991 г. н.э. (табл. 1) достаточно хорошо изучил и прочитал грамоту. В результате извержения вулкана Пинатубо на 10% уменьшилось с наступлением солнечной радиации, среднедовая глобальная температура воздуха уменьшилась на 0,5–0,6 °C.

Одновременно с понижением температуры воздуха происходил нагрев стратосферы. на несколько градусов выше среднего значения- ний последствия поглощения радиации аэрозо-лями. Стратосферные вулканические облака сохранялись в атмосфере в течение трех лет после извержения. Несмотря на глобальный климатический эффект, извержение Пинату-бо не оказало значительного влияния на рост экономики. и годовичные колец деревьев из вы-сокоширотных и высокогорных территорий Евразии.

Таким образом, экстремальные явления 536 и 541 гг. н.э. характеризуются аномально-ми изменениями глубины клеточной стенки. (CWT) для ЯК и АЛТ. Существенные изменения были зафиксированы для хро-нологии  $\delta^{18}O$ , построенной для АЛТ. 1258 г. очень экстремальный для CWT и TRW для исследования всех районов, в то время как аномалии 1259 г. записаны в TRW, MXD и  $\delta^{13}C$ . 1642 г. н.э. классифицировался как очень экстремальный для УАК и ТАУ, но не для АЛТ. По хронологии ЯК для колец 1992 г. зафиксированы аномальные значения MXD и CWT. В хронологии АЛТ для колец

1993 г. н.э. определены аномальные значения CWT и  $\delta^{18}O$  (рис. 1).

Климатическая функция срабатывания между метеорологическими данными и параметрами годовичных колец Температурный сигнал

Корреляционный анализ показывает показатели значимых связей ( $p < 0,05$ ) для АЛТ между TRW ( $r = 0,52$ ), MXD ( $r = 0,57$ ),  $\delta^{13}C$  ( $r = 0,38$ ), CWT ( $r = 0,28$ ). ) и температурной воз-духа июня. В то же время температура июля

открытие отражает изменчивость всех па-размеры годовичных колец во всех окрестностях исследования с диапазоном значений коэффициента соответствуют от  $r = 0,28$  до  $r = 0,60$ , за

за исключением хронологии TAY по  $\delta^{18}\text{O}$ . Температура августа влияет на изменчивость MXD и CWT для ЯК ( $r = 0,34$  и  $r = 0,40$  соответственно);  $\delta^{18}\text{O}$  ( $r = 0,48$ ),  $\delta^{13}\text{C}$  ( $r = 0,33$ ) и CWT ( $r = 0,28$ ) для АЛТ. Влияние общей для всех параметров влияния температуры было выявлено

статистическая значимая связь между температурой воздуха февраля и  $\delta^{18}\text{O}$  целлюлозы для YAK и ALT ( $r = 0,25$  и  $r = 0,26$  соответственно). Для хронологии TAY по  $\delta^{18}\text{O}$  выявлены значимые связи с температурой воздуха весенних месяцев марта и мая ( $r = 0,30$  и  $r = 0,35$  соответственно). Такие параметры годового колец, как TRW, MXD и CWT, сви-

детельствуют о наличии летней температуры-ных аномалий в течение 536, 541, 542, 1258, 1259 гг. н.э. для исследования всех окрестностей. После XIII в. снижение температуры после мощных стратосферных вулканических извержений столь же не выражено по данным всех параметров годовых колец. Например, снижение летней температуры воздуха в 1641 г. была зафиксирована изменчивость CWT для ALT, а в 1642 г. – для хронологии TRW

из ЯК.

Однако 1643 г. зафиксировали как экстремально холодный для TAY, обращаясь к данным по TRW и CWT; 1816 г. был холодным для ЯК, по данным хронологии CWT. Холодный 1992 г. после извержения вулкана Пинатубо было зафиксировано в хронологиях MXD и CWT для ЯК; 1993 г. был холодным для АЛТ по сравнению с 1992 г., по данным CWT и  $\delta^{18}\text{O}$  хронологии.

Сопоставление хронологий, получено в различных условиях годовых колец лиственницы из высокоширотных и высоко-исследования горных районов, указывает на различные климатические сигналы, фиксированные деревьями лиственницы после мощных стратосферных извержений. Длительный

период с низкими летними температурами вызвало снижение фотосинтетической активности, что привело к образованию узких годовых колец в 536, 541 и 1258, 1259 гг. н.э. Исключительную причину за последние 1500 лет - это очень малое количество клеток в 536-538 гг. н.э. Так, в случае образцы ЯК за 537 г. было найдено всего 2 клетки, что значит меньше

среднее число трахеид в кольце, в среднем изменяющегося в разрезе 12-17 клеток для высокоширотных районов и до 30 клеток для высокогорного АЛТ.

увеличение снижения результатов по  $\delta^{18}\text{O}$  в 536 г. (-4,8σ) относительно периода с 516 по 560 г. для ALT может оказаться экстремально низкие температуры в течение лета и держам морозобойных колец (Мыглан и др., 2008; Чуракова (Сидорова) и др., 2014). Извержение вулкана Паркер в 1640 г. отразилось в Сибирских хронологиях на два года позже. Современное извержение вулкана Пинатубо в год извержения 1991 г. не отрази-

было в анализируемых хронологиях, и только в следующем 1992 г. было зафиксировано данное событие на ЯК и в 1993 г. на АЛТ. Такого рода аномалии с запаздыванием в одном год или несколько лет могут наблюдаться разности распределения пылевых завес после извержения и нарушения атмосферной циркуляции воздуха, приводящие к повышенной облачности (Brönnimann, Krämer, 2016).

Зимние и весенние аномальные потепления после извержения вулкана Пинатубо (Робок, Мао, 1992) согласуются с хронологией по  $\delta^{18}\text{O}$  для TAY и ALT. Однако долго торговое похолодание или аномальные изменения в клеточных стенках трахеидных годовых колец, как это было найдено для 536, 541 гг. н.э. (Чуракова (Сидорова) и др., 2014, 2019), обнаружено не было.

## Сигнал на осадке

(дефицит влажности воздуха)

Выявлены статистически значимые

отрицательные связи между осадками июля и соотношением стабильных изотопов к кислороду  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе годовичных колец ( $r = -0,34$ ;  $p < 0,05$ ) для ЯК. Осадки начала июля коррелируют также с хронологиями  $\delta^{13}\text{C}$  для TAY ( $r = -0,51$ ;  $p < 0,05$ ) и ALT ( $r = -0,54$ ;  $p < 0,05$ ). Значимые соответствия были выявлены между

данные по осадкам августа и изотопным расположением  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе листовых для ALT ( $r = -0,29$ ;  $p < 0,05$ ). Напротив, для на этом участке положительные значимые связи были обнаружены между осадками марта и TRW ( $r = 0,37$ ;  $p < 0,05$ ), MXD ( $r = 0,32$ ;  $p < 0,05$ ), а также CWT ( $r = 0,34$ ;  $p < 0,05$ ).

Изменения среднемесячных результатов дефицита влажности воздуха в июне, июле и августе влияют на  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюлозе годовичных колец для ALT ( $r = 0,67$ ,  $r = 0,55$  и  $r = 0,46$ ) за период с 1950 по 2000 г. Изотопные соотношения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в целлюло-

зе ЯК-новости коррелируют с уменьшением упругости водяного пара (VPD) июля ( $r = 0,69$  и  $r = 0,31$  соответственно). Согласно хронологии данных VPD, полученных для TAY, выявлено не было.

Наличие воды является условием условием для лиственницы, производящей в экстремально холодных климатических условиях в условиях сплошного распространения многолетние мерзлоты, которая может рассматриваться в качестве резервуара и дополнительного источника воды в засушливые периоды (Сугимото и др., 2002; Бойке и др., 2013; Саурер и др., 2016; Чуракова (Сидорова) и др., 2016). Однако на северо-востоке Якутии (ЯК) (Чуракова (Сидорова) и др., 2016) талая мерзлотная вода не всегда может быть

использованные химические вещества произрастают там причины возникновения дополнительной конструкции-

туры корневой системы (поверхностные корни) или пониженной температуры воды (Чуракова (Сидорова) и др., 2016).

Изменения количества добавок июля предполагают изменения в изотопном составе завернуто в целлюлозный годовой колец, который содержит сигнал об обеспечении относительной влажности воздуха и доступности почвенной влаги. Значимые отрицательные статистическая связь между осадками июля и  $\delta^{13}\text{C}$  в целлюлозе объясняются соблюдением условий увлажнения для современного периода по сравнению с VI или XIII в. н.э. Распространение пылевой завесы после мощных стратосферных извержений вулканов приводит к уменьшению при солнечной энергии.

излучения, что ведет, в свою очередь, к понижению температуры воздуха, снижению ВПД и снижению фотосинтетической активности. Данный эффект зафиксирован в снижении  $\delta^{13}\text{C}$  в целлюлозе годовичных колец.

Выявлено отсутствие значимых климатических аномалий после извержения вулкана Тамбора в течение 1815 и 1816 гг. в высокоширотных регионах Азии, в то время как холодные и влажные состояния были выявлены для ALT в течение лета 1817 г. По данным хронологий, полученных по стабильным изотопам здоровья и здоровья, лето 1992 г. было влажным на ALT по сравнению с холодом 1991 г. Положительные связи между ВПД и  $\delta^{18}\text{O}$  для ЯК и ALT свидетельствуют о том, что увеличение температуры приводит к повышению эвапотранспирации.

Измерение облачности на изотопной состав кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в целлюлозе годовичных колец после стратосферных извержения вулканов

Значимое влияние продолжительности Солнечное сияние в июле было зафиксировано в  $\delta^{18}\text{O}$  целлюлозы для ЯК ( $r = 0,73$ ;

$p < 0,05$ ) и АЛТ ( $r = 0,51$ ;  $p < 0,05$ ) за период с 1961 по 2000 г. Инструментальные измерения длительность ультрафиолетового излучения для современного периода для YAK и ALT обнаруживают значимую связь с  $\delta^{18}O$  в целлюлозе годовых колец. По данным изотопной композиции  $\delta^{18}O$  в целлюлозе, продолжительность солнечного сияния значительно уменьшились на 536, 541, 542, 1258 и 1259 гг. для YAK и 536 г. для АЛТ. Однако летом 1991 г. (извержение вулкана Пинатубо) на YAK было солнечным.

Хронология по изотопной композиции ( $\delta^{18}O$ ) для YAK и ALT отмечают низкий уровень продолжительности летнего солнечного излучения в течение VI и XIII вв. и низкие значения летней температуры. Лето 1991 г. в сибирских регионах было достаточно солнечного света. В год извержения вулкана Пинатубо его влияние на продолжительность микроволнового сияния в летний период не зафиксировано, но отмечено спустя 1 год для YAK и TAY, в то время как для ALT два годами позже.

#### Заключение

Многочисленный подход, используемый в данной работе, позволяет получить информацию об уровне выбросов, дефицита влажности воздуха и облачности после крупных стратосферных извержений вулканов, т. е. факторах, которые невозможно было выбрать, используя только надежный годичный

кольца. Анализ изменчивости ширины древесных колец, большей плотности поздней древесины, глубины клеточной стенки трахеида и  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  в целлюлозе годовых колец дает шанс синхронность холодных и летних каникул малый с уменьшением итоговой продолжительности чувствительность микроволнового сияния в течение 1258 г. и 1259 гг. н.э. для высокоширотных и высокогорных районов Сибири. Однако после стратосферных извержений вулканов 535 и 540 гг. н.э. отмечено повышение влажности в высокоширотных регионах. Стратосферные вулканические извержения последних пяти лет столетий не влияют на качество работника на лесных экосистемах, высокоширотных и высокогорных районах Сибири по сравнению с вулканическими извержениями первого тысячелетия (540, 1257 гг. н.э.). После XIII в. снижение температуры после мощных стратосферных вулканических извержений не фиксировалось одновременно всеми исследованными параметрами годовых колец и в параметры большинства случаев реагировали на эти события спустя год или два. Выявлено, что не все стратосферные вулканические извержения приводят к интенсивному похолоданию и уменьшению температуры в субарктических регионах Сибири, экосистемы которых наиболее чувствительны к изменениям любым климатом, как на открытом воздухе, так и в глобальных масштабах.

#### Благодарности / Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ 16-55-76012 Эра\_а («Влияния крупных извержений вулканов на климат и общество Евразии: свидетельства прошлого и прогнозирование будущего», анализ вулканических извержений по данным направления годовых колец деревьев для субарктики Евразии), ЭраНет Рус Плюс СНФ IZRPZ0\_16473 («Влияние крупных извержений вулканов на климат Евразии и Общества: разгадывание прошлых свидетельств для прогнозирования будущих последствий», анализ вулканических извержений по данным стабильных изотопов цикла и кислорода в целлюлозе годовых колец деревьев для субарктики Евразии), РНФ 19-14-00028 («Экстремальные (катастрофические) засухи на юге Сибири за последнее тысячелетие», исполнение



анализ стабильных изотопов цикла и дыхания, измерение анатомических параметров для экстремальных лет, характеристики засушливых состояний в Алтае-Саянских регионах), программа Мария Кюри EU\_ISOTREC 235122, 909122 («Климатические и экологические изменения в Евразийской Субарктике, выведенные на основе древесных колец и хронологии стабильных изотопов» за прошлый и недавний периоды», измерение диапазона годовичных колец и изотопной композиции углерода-рода и кислорода в целлюлозе годовичных колец деревьев для субарктических районов Евразии), а также проект РФФИ 18-45-240001-р\_а («Прогноз регионально-специфичных откликов бореальных лесовальных горных районов Сибири на глобальные изменения природной среды и траекторий эволюции ландшафтов для воздействия экологических рисков и эффективного долгосрочного планирования деятельности различных отраслей экономики», анализ и изменение климата в субарктических регионах Сибири после аномальных глобальных событий. масштаб).

Авторы признанным рецензентам дали статьи с рекомендациями и ценными советами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-55-76012 Era\_a, предоставленного Е.А. Ваганову для проведения анализа вулканических извержений на основе ширины годовичных колец деревьев в Евразийской Субарктике, и гранта EraNet Rus Plus SNF IZRPZO\_16473, предоставленного М. Штоффелю («Влияние крупных вулканических извержений на климат и общества Евразии: анализ прошлых свидетельств для прогнозирования будущих последствий», для проведения анализа вулканических извержений на основе стабильных изотопов углерода и кислорода в целлюлозе годовичных колец деревьев в Евразийской Субарктике), гранта Российского научного фонда RNF 19-14-00028, предоставленного В.С. Мыглану («Экстремальные (катастрофические) засухи на юге Сибири за последнюю тысячу лет» для проведения анализов стабильных изотопов углерода и кислорода, измерений анатомических параметров древесины в экстремальные годы, характеризующиеся засушливыми условиями в Алтае-Саянском горном регионе); Индивидуальная стипендия Марии Кюри предоставлена О.В. Чураковой (Сидоровой) в рамках проектов EU\_ISOTREC 235122, 909122 («Климатические и экологические изменения в Евразийской Субарктике, установленные на основе хронологий годовичных колец и стабильных изотопов для прошлых и современных периодов» за выявление климатических и экологических изменений после крупных вулканических извержений в Евразийской Субарктике); и РФФИ 18-45-240001-р\_а («Прогнозирование региональных реакций сибирских горных лесов на глобальные изменения окружающей среды и траекторий развития ландшафтов для снижения экологических рисков и эффективного долгосрочного планирования в различных секторах экономики» за анализ и оценку климата в регионах Сибирской Субарктики после глобальных изменений).

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за комментарии и ценные предложения.

#### Список литературы / Ссылки

Абаимов А.П., Бондарев А.И., Зырянова О.А., Шитова С.А. (1997) Леса Красноярского Заполярья. Новосибирск, Наука, 207 с. [Абаимов А.П., Бондарев А.И., Изранова О.В., Шитова С.А. (1997) Полярные леса Красноярского края. Новосибирск, Наука, 207 с.]

Сидорова О.В., Наурзбаев М.М. (2002) Реакция на климатические изменения лиственницы Каяндера на верхних границах леса и в долине реки Индигирки. Лесоведение, 2: 73-75 [Сидорова О.В., Наурзбаев М.М. (2002) Реакция *Larix sibirica* на климатические изменения в верхней границе леса и в долине реки Индигирки. Российский лесотехнический журнал [Лесоведение], 2: 73-75 (на русском языке)]

Бэйли MGL (1994) Дендрохронология поднимает вопросы о природе пылевой завесы 536 г. н.э. событие. Голоцен, 4(2): 212-217



- Баринов В.В., Мыглан В.С., Тайник А.В., Ойдупаа О.Ч., Агатова А.Р., Чуракова (Сидорова) О.В. (2018) Экстремальные климатические явления в Алтае-Саянском регионе как индикатор крупных извержений вулканов. Геофизические процессы и биосфера, 17: 45-61.
- Баттипалья Г., Керубини П., Заурер М., Зигвольф Р.Т., Струмия С., Котруфо М.Ф. (2007) Вулканические взрывные извержения Везувия снижают рост годовых колец, но не скорость фотосинтеза в окружающих лесах. Биология глобальных изменений, 13(6): 1122-1137
- Boike J., Kattenstroth B., Abramova K., Bornemann N., Chetverova A., Fedorova I., Fröb K., Grigoriev M., Grüber M., Kutzbach L., Langer M., Minke M., Muster S., Piel K., Pfeiffer E.-M., Stoof G., Westermann S., Wischniewski K., Wille C., Hubberten H.-W. (2013) Базовые характеристики климата, вечной мерзлоты и земельного покрова из новой обсерватории вечной мерзлоты в дельте реки Лена, Сибирь (1998-2011). Biogeosciences, 10(3): 2105-2128
- Бриффа КР, Джонс П.Д., Швайнгрубер Ф.Х., Осборн Т.Дж. (1998) Влияние вулканических извержений на Летняя температура в Северном полушарии за последние 600 лет. Природа, 393(6684): 450-455
- Брённиманн С., Кремер Д. (2016) Тамбора и «Год без лета» 1816 года. перспектива науки о Земле и человеческих системах. Geographica Bernensia G90, 48 стр.
- Бюнтген У., Миглан В.С., Юнгквист ФК, Маккормик М., Ди Космо Н., Зигль М., Юнгклаус Й., Вагнер С., Крушич П.Дж., Эспер Й., Каплан Й.О., де Ваан М.А.К., Лютербахер Й., Вакер Л., Тегель В., Кирдянов А.В. (2016) Похолодание и социальные изменения во время позднеантичного малого ледникового периода с 536 по 660 г. н.э. Nature Geoscience, 9(3): 231-236
- Чуракова (Сидорова) О.В., Фонти М.В., Заурер М., Гийе С., Корона К., Фонти П., Мыглан В.С., Кирдянов А.В., Наумова О.В., Овчинников Д.В., Шашкин А.В., Панюшкина И.П., Бюнтген У., Хьюз М.К., Ваганов Е.А., Зигвольф Р.Т.В., Стоффель М. (2019) Сибирские древесные кольца и прокси-стабильные изотопы как индикаторы изменений температуры и влажности после крупных стратосферных извержений вулканов Климат прошлого, 15(2): 685-700
- Чуракова (Сидорова) О.В., Брюханова М.В., Заурер М., Беттгер Т., Наурзбаев М.М., Мыглан В.С., Ваганов Е.А., Хьюз М.К., Зигвольф Р.Т.В. (2014) Группа стратосферных вулканических извержений в 530-х годах нашей эры, зафиксированная в кольцах деревьев Сибири. Глобальные и планетарные изменения, 122: 140-150
- Чуракова (Сидорова) О.В., Шашкин А.В., Зигвольф Р.Т., Спани Р., Лонуа Т., Заурер М., Брюханова М.В., Бенькова А.В., Купцова А.В., Пейлин П., Ваганов Е.А., Массон-Дельмотт В., Роден Дж. (2016) Применение эколого-физиологических моделей к климатической интерпретации  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$ , измеренных в годовых кольцах лиственницы сибирской. Дендрохронология, 39: 51-59
- D'Arrigo R., Jacoby G., Frank D., Pederson N., Cook E., Buckley B., Nachin B., Mijiddorj R., Dugarjav C. (2001) 1738-летняя изменчивость температуры в Монголии, выведенная из хронологии ширины годовых колец сибирской сосны. Geophysical Research Letters, 28(3): 543-546
- Фонти П., Брюханова М.В., Мыглан В.С., Кирдянов А.В., Наумова О.В., Ваганов Е.А. (2013) Температурные реакции структуры ксилемы *Larix sibirica* (Pinaceae) с Русского Алтая. Американский журнал ботаники, 100(7): 1332-1343
- Fritts HC (1976) Годичные кольца и климат. Academic Press, 582 стр.
- Gao C., Robock A., Ammann C. (2008) Вулканическое воздействие на климат за последние 1500 лет: улучшенный индекс на основе ледяных кернов для климатических моделей. Журнал геофизических исследований-Атмосферы, 113(D23): D23111

Gennaretti F., Huard D., Naulier M., Savard M., Bégin C., Arseneault D., Guiot J. (2017) Байесовская мультипрокси-реконструкция температуры с шириной колец черной ели и стабильными изотопами из тайги северного Квебека. *Climate Dynamics*, 49(11-12): 4107-4119

Джиллетт Н.П., Уивер А.Дж., Цвирс Ф.В., Венер М.Ф. (2004) Обнаружение вулканического влияния на Глобальные осадки. *Geophysical Research Letters*, 31(12): L12217

Гройсман П.Ю. (1992) Возможные региональные климатические последствия извержения вулкана Пинатубо. *Геофизические Исследовательские письма*, 19(15): 1603-1606

Гийе С., Корона К., Стоффель М., Ходри М., Лавин Ф., Ортега П., Эккерт Н., Силену П.Д., Даукс В., Чуракова (Сидорова) О.В., Дави Н., Эдуард Ж.Л., Чжан Й., Лакман Б.Х., Миглан В.С., Гио Дж., Бенистон М., Массон-Дельмотт В., Оппенгеймер К. (2017) Реакция климата на извержение вулкана Самалас в 1257 году, выявленная по косвенным данным. *Природа и геонауки*, 10(2): 123-128.

Хьюз М.К., Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Тучан Р., Фанкхаузер Г. (1999) Двадцатый век Летнее тепло в северной Якутии в 600-летнем контексте. *Голоцен*, 9(5): 629-634

Iles CE, Hegerl GC (2014) Глобальная реакция осадков на вулканические извержения в CMIP5 модели. *Письма об исследованиях окружающей среды*, 9(10): 104012

Келли П.М., Джонс П.Д., Пенгун Дж. (1996) Пространственная реакция климатической системы на взрывные вулканические извержения. *Международный журнал климатологии*, 16(5): 537-550

Кракауэр, Нью-Йорк, Рандерсон, Дж. Т. (2003) Увеличивают или уменьшают ли вулканические извержения чистый первичный Производство? Данные из годовичных колец. *Глобальные биогеохимические циклы*, 17(4): 1118

LaMarche VC, Hirschboeck KK (1984) Морозные кольца на деревьях как свидетельства крупных вулканических извержений. *Nature*, 307(5947): 121-126

Ларсен Л.Б., Винтер Б.М., Бриффа К.Р., Мелвин Т.М., Клаузен Х.Б., Джонс П.Д., Сиггаард-Андерсен М.-Л., Хаммер К.У., Эронен М., Грудд Х., Гуннарсон Б.Е., Хантемиров Р.М., Наурзбаев М.М., Николусси К. (2008) Новые ледяные керны, свидетельствующие о вулканической причине пылевой завесы 536 года нашей эры. *Письма о геофизических исследованиях*, 35(4): L04708

Лавин Ф., Дега Ж.-П., Коморовски Ж.-К., Гийе С., Роберт В., Лаитт П., Оппенгеймер К., Стоффель М., Видаль К.М., Суруно, Пратомо И., Вассмер П., Хайдас И., Хадмоко Д.С., Белизал Э. (2013) Раскрыт источник великого таинственного извержения 1257 г. н.э., вулкан Самалас, вулканический комплекс Ринджани, Индонезия. *Труды Национальной академии наук Соединенных Штатов Америки*, 110(42): 16742-16747

Loader NJ, Robertson I., Barker AC, Switsur VR, Waterhouse JS (1997) Улучшенная технология пакетной обработки небольших образцов цельной древесины в альфа-целлюлозу. *Химическая геология*, 136(3-4): 313-317

Лоу Дж. М., Фриттс Х. К. (1987) Оценка возможных последствий вулканических извержений для климата Северной Америки с использованием данных годовичных колец деревьев, 1602-1900 гг. н.э. *Изменение климата*, 10(3): 219-239

Мыглан В.С., Ойдупаа О.Ц., Кирдянов А.В., Ваганов Е.А. (2008) Древесно-кольцевая хронология 1929 года для Алтае-Саянского региона (Западная Тува). *Археология, этнология и антропология Евразии*, 36 (4): 25-31

Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А., Сидорова О.В., Швайнгрубер Ф.Х. (2002) Летние температуры на восточном Таймыре, определенные на основе 2427-летней позднеголоценовой древесно-кольцевой хронологии и более ранних плавающих серий. *Голоцен*, 12(6): 727-736

Омурова Г.Т., Баринов В.В., Кардаш О.В., Ваганов Е.А., Мыглан В.С. (2018) Реконструкция экстремальных палеоклиматических событий на северо-западе Сибири по древней древесине Надымского острога.

Археология, этнология и антропология Евразии, 3: 32-40

Ranofsky HA, Brier GW (1958) Некоторые приложения статистики в метеорологии. University Park, PA. Службы распространения знаний в горнодобывающей промышленности, колледж горнодобывающей промышленности, Университет штата Пенсильвания, 224 стр.

Панюшкина ИП, Хьюз МК, Ваганов ЕА, Манро MAP (2003) Летняя температура в северо-восточная Сибирь с 1642 года, реконструированная по размерам трахеид и числу клеток *Larix sibirica*. Канадский журнал лесных исследований, 33(10): 1905-1914

Пирсон CL, Дейл DS, Брюэр PW, Кунихольм PI, Липтон J., Мэннинг SW (2009) Дендрохимический анализ аномалии роста годовичных колец деревьев, связанной с извержением Тире в позднем бронзовом веке. Журнал археологической науки, 36(6): 1206-1214

Пламмер К.Т., Карран М.А.Д., ван Оммен Т.Д., Расмуссен С.О., Мой А.Д., Вэнс Т.Р., Клаузен Х.Б., Винтер Б.М., Маевски П.А. (2012) Независимые датированные вулканические записи 2000-летнего периода из Лоу-Доум, Восточная Антарктида, включая новый взгляд на датировка извержения Куваэ, Вануату, 1450-ми годами н.э. Климат прошлого, 8 (6): 1929–1940 гг.

Основная группа R. R (2016) Язык и среда для статистических вычислений. Вена, Австрия

Ригби Э., Саймондс М., Уорд-Томпсон Д. (2004) Удар кометы в 536 г. н. э.? Астрономия и геофизика, 45(1): 1.23-1.26

Робок А. (2000) Вулканические извержения и климат. Обзоры геофизики, 38(2): 191-219

Робок А., Лю Й. (1994) Вулканический сигнал в Институте космических исследований Годдарда, три Моделирование размерной модели. Журнал климата, 7(1): 44-55

Робок А., Мао Дж. (1992) Зимнее потепление из-за крупных вулканических извержений. Геофизические исследования Письма, 19(24): 2405-2408

Зальцер М.В., Хьюз М.К. (2007) Годичные кольца сосны остистой и вулканические извержения за последние 5000 лет. Четвертичные исследования, 67(1): 57-68

Saurer M., Kirydanov AV, Prokushkin AS, Rinne KT, Siegwolf RTW (2016) Влияние обратной климато-изотопной зависимости в почвенной воде на кислородно-изотопный состав *Larix gmelinii* в Сибири. New Phytologist, 209(3): 955–964

Шнайдер Л., Смердон Дж.Э., Бюнтген У., Уилсон Р.Дж.С., Мыглан В.С., Кирдянов А.В., Эспер Дж. (2015) Пересмотр летних температур в средних широтах до 600 г. н.э. на основе сети плотности леса. Письма геофизических исследований, 42(11): 4556-4562

Schweingruber FH (1996) Годичные кольца деревьев и дендрозология окружающей среды. Paul Haupt Publ Bern, Штутгарт, Вена, 609 с.

Сидорова О.В., Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А. (2005) Реакция древесно-кольцевых хронологий, произрастающих на территории Северной Евразии, на мощные вулканические извержения. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 20: 60-72.

Сидорова О.В., Заурер М., Мыглан В.С., Эйхлер А., Швиковски М., Кирдянов А.В., Брюханова М.В., Герасимова О.В., Калугин И.А., Дарьин А.В., Зигвольф Р.Т.В. (2012) Многопрокси-подход для выявления последних климатических изменений на Российском Алтае. Динамика климата, 38 (1-2): 175–188

Сидорова О.В., Зигвольф Р.Т.В., Мыглан В.С., Овчинников Д.В., Шишов В.В., Хелле Г., Лоадер Н.Дж., Заурер М. (2013) Применение годовичных колец и стабильных изотопов для реконструкции климатических условий на Русском Алтае. *Изменение климата*, 120(1-2): 153-167

Сидорова О.В., Зигвольф Р.Т., Заурер М., Наурзбаев М.М., Шашкин А.В., Ваганов Е.А. (2010) Пространственные закономерности климатических изменений на севере Евразии, отраженные в параметрах годовичных колец лиственницы сибирской и стабильных изотопах. *Биология глобальных изменений*, 16(3): 1003-1018

Сидорова О.В., Зигвольф РТВ, Заурер М., Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А. (2008) Изотопный состав ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) в древесине и целлюлозе сибирской лиственницы раннего средневековья и современного периода. *Журнал геофизических исследований-Биогеофизика*, 113(G2): G02019

Sigl M., McConnell JR, Layman L., Maselli O., McGwire K., Pasteris D., Dahl-Jensen D., Steffensen JP, Vinther B., Edwards R., Mulvaney R., Kipfstuhl S. (2013) Новые данные биполярного ледяного ядра вулканизма из WAIS Divide и NEEM и их значение для воздействия на климат за последние 2000 лет. *Журнал геофизических исследований-Атмосферы*, 118(3): 1151-1169

Sigl M., Winstrup M., McConnell JR, Welten KC, Plunkett G., Ludlow F., Buening U., Caffee M., Chellman N., Dahl-Jensen D., Fischer H., Kipfstuhl S., Kostick C., Maselli OJ, Mekhaldi F., Mulvaney R., Muscheler R., Pasteris DR, Pilcher JR, Salzer M., Schuepbach S., Steffensen JP, Vinther BM, Woodruff TE (2015) Сроки и климатическое воздействие вулканических извержений за последние 2500 лет. *Nature*, 523(7562): 543-549

Стоффель М., Ходри М., Корона К., Гийе С., Пулен В., Бекки С., Гио Дж., Лакман Б.Х., Оппенгеймер К., Лебас Н., Бенистон М., Массон-Дельмотт В. (2015 г.) Оценки вызванного вулканами похолодания в Северном полушарии за последние 1500 лет. *Природные геолого-геофизические исследования*, 8(10): 784-788.

Стозерс РБ (1984а) Таинственное облако 536 г. н.э. *Природа*, 307(5949): 344-345

Стозерс РБ (1984b) Великое извержение Тамборы в 1815 году и его последствия. *Science*, 224(4654): 1191-1198

Стозерс РБ (1999) Вулканические сухие туманы, похолодание климата и пандемии чумы в Европе и Ближний Восток. *Изменение климата*, 42(4): 713-723

Стозерс РБ (2000) Климатические и демографические последствия мощного извержения вулкана 1258 года. *Изменение климата*, 45(2): 361-374

Сугимото А., Янагисава Н., Найто Д., Фудзита Н., Максимов Т.С. (2002) Важность вечной мерзлоты как источник воды для растений в восточносибирской тайге. *Экологические исследования*, 17(4): 493-503

Туши М., Сигл М. (2017) Вулканические стратосферные выбросы серы и оптическая плотность аэрозоля с 500 г. до н.э. по 1900 г. н.э. *Earth System Science Data*, 9(2): 809-831

Ваганов Е.А., Хьюз М.К., Шашкин А.В. (2006) Динамика роста колец хвойных деревьев. Springer Verlag, Берлин, 353 с.

Зелински GA, Майевски PA, Микер LD, Уитлоу S., Твиклер MS, Моррисон М., Миз DA, Гоу AJ, Элли RB (1994) Запись вулканизма с 7000 г. до н. э. по данным ядра льда Гренландии GISP2 и их значение для вулкано-климатической системы. *Science*, 264 (5161): 948-952

Вегманн М., Брённиманн С., Бенд Дж., Франке Дж., Фолини Д., Уайлд М., Лютербахер Дж. (2014) Влияние вулканов на летние осадки в Европе через муссоны: возможная причина «лет без лета». *Журнал климата*, 27(10): 3683-3691