

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/15>

УДК 630\*561.24



## Применение процессного моделирования для интерпретации вариации стабильных изотопов в годичных кольцах деревьев

Наталья Д. Васильева<sup>1,2</sup>, [tusa3105@mail.ru](mailto:tusa3105@mail.ru)  <https://orcid.org/0009-0000-2821-5159>  
Светлана Н. Софронова<sup>1,2</sup>, [ssn@iph.krasn.ru](mailto:ssn@iph.krasn.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-3486-9874>  
Валентин В. Баринов<sup>1</sup>, [vvbarinov@sfu-kras.ru](mailto:vvbarinov@sfu-kras.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-3582-3440>  
Анна В. Тайник<sup>1</sup>, [ataynik@sfu-kras.ru](mailto:ataynik@sfu-kras.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-7441-6947>  
Татьяна В. Трушкина<sup>3</sup>, [trushkinatv@sibsau.ru](mailto:trushkinatv@sibsau.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-5585-0286>  
Ольга В. Чуракова<sup>1</sup> , [ochurakova@sfu-kras.ru](mailto:ochurakova@sfu-kras.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1687-1201>

<sup>1</sup>Сибирский Федеральный Университет, 660041, пр. Свободный, 79, Красноярск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Академгородок, 50, г. Красноярск, Российская Федерация, 660036

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Красноярский рабочий 31, 660037, Российская Федерация

Ширина годичных колец деревьев и изотопный состав стабильных изотопов углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ), кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta^2\text{H}$ ) в целлюлозе годичных колец широко используются для реконструкций условий окружающей среды. Применение моделей, способных описать вариацию стабильных изотопов в годичных кольцах деревьев, представляет собой набор инструментов для интерпретации изменений окружающей среды на экофизиологическом уровне. В данной работе хронологии с погодичным временным разрешением, полученные по стабильным изотомам  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в целлюлозе годичных колец хвойных для региона Дельта реки Маккензи в Канаде ( $68^\circ 30'$  с.ш.,  $133^\circ 48'$  з.д.) для периода с 1901 по 2009 гг., были сопоставлены с модельными расчетами для интерпретации экофизиологического сигнала. При помощи процессной модели (LPX) нам удалось смоделировать  $\delta^{13}\text{C}$  вариацию, значимо коррелирующую с измеренными данными ( $r = 0.29$ ;  $p = 0.002$ ) для периода с 1901 по 2009 гг. Модельные расчеты по кислороду и водороду требуют дальнейшего преобразования модельных блоков, в частности, требуют доработки включения источника воды, используемой деревьями, блока оттаивания и промерзания почвы с учетом вечной мерзлоты, а также экспериментальных данных по содержанию  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в воде.

**Ключевые слова:** дендрохронология, стабильные изотопы, моделирование, углерод, кислород, водород

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00006, (<https://rscf.ru/en/project/21-17-00006/>)

**Благодарности:** Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Применение процессного моделирования для интерпретации вариации стабильных изотопов в годичных кольцах деревьев / Н. Д. Васильева, С. Н. Софронова, В. В. Баринов, А. В. Тайник, Т. В. Трушкина, О. В. Чуракова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 23–38. – Библиогр.: с. 33–37 (33 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/15>.

Поступила 09.11.2023 Пересмотрена 07.12.2023 Принята 12.12.2023 Опубликована онлайн 16.01.2024


## Application of process-based modelling for interpretation of stable isotope variations in tree rings


Nataliya D. Vasilieva<sup>1,2</sup>, tusa3105@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0000-2821-5159>

Svetlana N. Sofronova<sup>1,2</sup>, sofronova\_77@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3486-9874>

Valentin V. Barinov<sup>1</sup>, vvbarinov@sfu-kras.ru  <https://orcid.org/0000-0002-3582-3440>

Anna V. Taynik<sup>1</sup>, ataynik@sfu-kras.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7441-6947>

Tatyana V. Trushkina<sup>3</sup>, trushkinatv@sibsau.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5585-0286>

Olga V. Churakova<sup>1,4</sup>  ochurakova@sfu-kras.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1687-1201>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, 660041, Svobodny 79, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>2</sup>L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, 660036, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>3</sup>M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochy 31, 660037 Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>4</sup>Kazan Federal University, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kremlyovskaya str. 18, Kazan 420008, Russian Federation

### Abstract

Tree-ring width and stable isotopes (carbon, oxygen, and hydrogen) in tree-ring cellulose are widely used to reconstruct environmental conditions. The application of models capable to describe a variation of stable isotopes in annual tree rings can be a powerful tool for interpretation of environmental changes at the eco-physiological level. In this paper, we modelled carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ), oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ), and hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) variations at the tree-ring level and compared results with measured data, obtained from the Mackenzie Delta River (68°30' N, 133°48' W) for the common period from 1901 to 2009. Using a process-based model (LPX), we were able to simulate carbon isotope values, which significantly ( $r = 0.29$ ;  $p = 0.002$ ) correlate with measured carbon isotope values. The model calculations for oxygen and hydrogen require further modifications and improvements, in particular the inclusion of the source of water used by the trees in the Canadian subarctic, as well as  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  in the water.

**Keywords:** dendrochronology, stable isotopes, modelling, carbon, oxygen, hydrogen

**Funding:** This study was supported by the Russian Science Foundation grant № 21-17-00006, (<https://rscf.ru/en/project/21-17-00006/>).

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Vasilieva N. D., Sofronova S. N., Barinov V. V., Taynik A. V., Trushkina T. V., Churakova O. V. Application of process-based modelling for interpretation of stable isotope variations in tree rings. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 2, pp. 23-38 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/15>.

*Received* 09.11.2023. *Revised* 07.12.2023. *Accepted* 12.12.2023. *Published online* 16.01.2024

## Введение

Деревья, произрастающие на вечномерзлотных почвах в субарктических экосистемах, чувствительны к изменению климата, например, к повышению температуры, уменьшению количества осадков, и оттаиванию вечной мерзлоты [1, 31]. Из-за повышения температуры, дефицит упругости водяного пара (VPD) также увеличится относительно существующих климатических прогнозов [7], что приведет к увеличению испаряемости, а это особенно скажется на источнике воды для роста деревьев, особенно в зоне распространения вечномерзлотных почв. Климатические инструментальные и модельные данные показали отсутствие изменений в поступлении осадков, что может усилить стресс от засухи в ситуациях, когда повышенные потери воды не компенсируются большим поступлением влаги [23]. Деревья бореальной зоны реагируют на изменения влажности и температуры почвы, а также на глубину оттаивания вечной мерзлоты и её распределение, что само по себе напрямую зависит от снежного и растительного покрова, свойств почвы и геотермического теплового потока [3, 5]. Деревья, произрастающие в зоне вечной мерзлоты, подвергаются климатическим и экологическим изменениям, что представляет большой интерес из-за важной роли вечной мерзлоты в этих экосистемах и большого количества углерода, хранящегося в этих почвах [5].

Стабильные изотопы углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) и кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) являются индикаторами не только температурных сигналов в годовых кольцах деревьев, но и фиксируют важную информацию об изменениях влажности и об осадках. Такие климатические параметры, как температура воздуха и почвы, доступность воды, влажность воздуха и влияние изменений атмосферного  $\text{CO}_2$  на фотосинтетическую ассимиляцию и водный баланс, отражаются в изотопных соотношениях углерода и кислорода растительного органического вещества, потенциально обеспечивая изотопный «отпечаток» в древесине древесных колец. Анализ физиологических свойств деревьев с помощью изотопных соотношений углерода особенно эффективен в сочетании с моделью фотосинтеза, учитывающей влияние метеорологических параметров на функции растений,

таких как устьичная проводимость и концентрация  $\text{CO}_2$  внутри листа ( $c_i$ ) по отношению к концентрации  $\text{CO}_2$  в окружающей среде ( $c_a$ ), либо соотношение  $c_i/c_a$  [2, 13, 32].

Изотопы кислорода в органическом веществе изменяются под влиянием вариаций изотопного состава источника воды, который тесно связан с изотопным составом осадков и почвенной воды (хотя и изменяется под влиянием испарения на поверхности почвы). Изотопная композиция  $\delta^{18}\text{O}$  в воде напрямую связана с температурой воздуха в атмосфере [11], а также с процессами испарения и конденсации в глобальном круговороте воды. Входные влажностные характеристики воды модифицируются и обогащаются стабильным кислородом ( $^{18}\text{O}$ ) в листе в ходе процесса транспирации, что фиксируется в продуктах фотосинтеза (фотосинтатах), а также и в целлюлозе через процессы биохимического фракционирования и их обмена.

Источник воды для деревьев, например, талая мерзлотная вода в условиях вечномерзлотных почв, ранее таяние снега или увеличение атмосферных осадков оказывает влияние на вариацию  $\delta^2\text{H}$  в годовых кольцах деревьев. Так изотопное соотношение  $^2\text{H}/^1\text{H}$  в составе грунтовых вод может сильно отличаться от дождевых вод, так как они могут иметь другую площадь водосбора и другое временное происхождение, соответственно изотопный состав будет более обедненным либо наиболее обогащенным. В зависимости от глубины залегания корней и скорости транспирации, вода в ксилеме дерева может иметь смешанный изотопный состав почвы и грунтовых вод, при этом дальнейшее фракционирование водорода в процессе поглощения обычно не происходит. Вода в листе или хвое обогащается  $^2\text{H}$  за счёт транспирации изотопно более лёгкой воды. На этот эффект могут влиять изменения устьичной проводимости, а также климатические факторы – такие как температура и влажность воздуха [25].

Чтобы понять процессы, которые могут влиять на рост растений на этом участке вечной мерзлоты, такие как взаимодействие с осадками, замерзание и оттаивание слоев почвы, мы применили модель Land surface Processes and eXchanges (LPX-

Bern 1.0), разработанную в Бернском университете [28, 30].

Целью данной работы являлось применение процессной модели для дендроклиматических исследований, при помощи которой возможно выявить и объяснить экофизиологические процессы, влияющие на вариацию стабильных изотопов в целлюлозе годовичных колец, а также выявления основного источника воды для деревьев, произрастающих в зоне вечной мерзлоты в субарктике Евразии.

В данной работе мы провели расчет изотопной композиции углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ), кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ), а также впервые разработали модуль для расчета вариации стабильного изотопа водорода ( $\delta^2\text{H}$ ) в годовичных кольцах деревьев хвойных для района Дельта р. Маккензи в Канаде при помощи программного пакета LPX.

### Материалы и методы

Хронологии с 1900 по 2009 гг., для углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ), кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta^2\text{H}$ ) в целлюлозе годовичных колец, построенные по четырем деревьям *Picea glauca* (Moench) Voss, со средним возрастом 180 лет для участка Дельта р. Маккензи в Канаде (68° 24' с.ш., 133° 149' з.д.) были взяты из наших предыдущих публикаций [8].

Модельные расчеты по содержанию изотопов  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в целлюлозе были получены за более короткий период (1962-2012 гг.), поскольку прямых измерений содержания  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в почвенной воде и водяном паре за более длительный период не проводилось. Мы имеем доступ к результатам моделирования содержания  $\delta^{18}\text{O}$  в почвенной воде и водяном паре, выполненными авторами [19], в период 1962-2012 гг. и используем их в данной работе.

Модель LPX-Bern (далее LPX) - это улучшенная версия динамической глобальной модели растительности Lund-Potsdam-Jena (LPJ) [18, 27]. Модель LPX моделирует потоки воды, углерода и азота между наземной биосферой (почвой и растительностью) и атмосферой с суточным временным разрешением. Модель имитирует рост деревьев для средневозрастного древостоя из функциональных типов древесных растений, конкурирующих за

свет, воду и питательные вещества (например, доступность азота), сдерживаемых температурными ограничениями и атмосферным  $\text{CO}_2$ . В дополнение к стандартной модели LPJ, модель LPX моделирует диффузию тепла в почве, замерзание и оттаивание почвенной воды, а также условия вечной мерзлоты [33], которые особенно применимы к нашей системе (зоне вечной мерзлоты).

Моделирование вечной мерзлоты в LPX использует 8 типов минеральных почв [33]. Наибольшее влияние на теплообмен оказывает разделение на минеральные почвы (7 типов) и органические почвы (1 тип почвы торфяной суши) из-за разницы в радиальном приросте и, соответственно, в способности накапливать воду. В данном исследовании мы используем общий тип минеральной почвы ("Средняя текстура"), которая соответствует типу почв как суглинков [33]. Все остальные параметры использовались как в опубликованной версии модели, здесь наиболее важны параметры фотосинтеза [27] и блок вечной мерзлоты [33]. Модель откалибрована в глобальном масштабе для различных поверхностей почвы, типов растительности и экосистем.

Модуль вечной мерзлоты в LPX сравнивался с толщиной активного слоя на 20 объектах из Циркумпольярной сети мониторинга активного слоя, из которых 8 объектов находятся в России, а 3 из этих восьми объектов в Якутии. Смоделированные сезонные температуры почвы подвергались сравнению с измерениями на четырёх станциях в циркумпольярном регионе.

Модель LPX была успешно апробирована для расчета углерода и кислорода в годовичных кольцах деревьев для северо-востока Якутии [6, 9].

В данной работе мы не калибровали модель LPX для исследуемого участка в Канаде, но проверили межгодовую изменчивость глубины оттаивания с помощью данных с соседними участками [17], где она хорошо согласуется.

Наличие вечной мерзлоты влияет на глубину залегания корней и водный стресс, что модифицирует транспирацию растений через изменение устьичной проводимости [6, 9]. На основе рассчитанной устьичной проводимости и чистой скорости фотосинтеза модель LPX моделирует внутреннюю

эффективность использования воды и усвоенного углерода [26]. Чтобы уловить влияние "погодных эффектов" на  $\delta^{13}\text{C}$  в модели LPX, общее количество ежемесячных осадков распределяется случайным образом на заданное количество дождливых дней в месяце. Для распределения мы используем стохастическую модель в виде цепи Маркова первого порядка, где вероятность атмосферных осадков в виде дождя в определенный день зависит от состояния предыдущего дня [24, 29].

Для расчета изотопной вариации углерода использовался расчетный код, описанный ранее [27], а для расчетной вариации кислорода [21].

Для расчета изотопной вариации водорода ( $\delta^2\text{H}$ ) в целлюлозе годичных колец *Picea glauca* (Moench) Voss использовалась следующая формула:

$$\delta H_c = f * (\delta H_{sw} + \varepsilon_h) + (1 - f)(\delta H_{lw} + \varepsilon_a) \quad (1),$$

где коэффициент обмена синтеза целлюлозы  $f = 0,36$ ;

специфические автотрофные и гетеротрофные биосинтетические факторы фракционирования для изотопа водорода  $\varepsilon_a = -171 \text{‰}$ ,  $\varepsilon_h = 158 \text{‰}$ .

$\delta H_{sw}$  – изотопное соотношение в источнике воды (например, атмосферные осадки или талая мерзлотная вода), которое зависит от климатических условий и изменяется со временем.

Поскольку экспериментальные наблюдения изотопного состава воды для участков с разными климатическими условиями проводятся относительно недавно, то изменение изотопного соотношения в исходном источнике-воде со временем требует компьютерного моделирования. В работе [19] было проведено моделирование изотопного соотношения в почвенной воде и водяном паре для разных участков планеты, однако, нам недоступны эти модельные данные в полном объеме. На начальном этапе при расчете изотопного соотношения  $^2\text{H}/^1\text{H}$  в целлюлозе можно принять изотопное соотношение в исходной воде постоянным. Опираясь на известные экспериментальные данные изотопного соотношения в почвенной воде для района Маккензи Дельта в Канаде, и оценках изотопного соотношения в почвенной воде и водяном паре, приведенных в работе [19], мы выбрали два

значения  $-150 \text{‰}$  и  $-160 \text{‰}$  для использования в расчетах.

$\delta H_{lw}$  – изотопное соотношение воды в листе рассчитывается с помощью модифицированной модели Крейга-Гордона [12, 14, 15], согласно которой изотопное обогащение воды испарительной поверхности (листа) по сравнению с исходной водой можно аппроксимировать как:

$$\Delta_e \approx \varepsilon^+ + \varepsilon_k + (\Delta_V - \varepsilon_k) \frac{w_a}{w_i} \quad (2)$$

где  $\Delta_e$  – изотопное обогащение воды испарительной поверхности листа по сравнению с исходной водой,

$\varepsilon^+$  – равновесное фракционирование между водой в жидком состоянии и паром,

$\varepsilon_k$  – кинетическое фракционирование посредством диффузии через устьица и пограничный слой,

$\Delta_V$  изотопное обогащение атмосферного пара по сравнению с исходной водой и  $\frac{w_a}{w_i}$  – отношение молярных фракций водяного пара в воздухе по сравнению с таковой в межклеточных воздушных пространствах.

Таким образом,  $\frac{w_a}{w_i}$  представляет собой относительную влажность, но с молярной долей насыщенного водяного пара в знаменателе, рассчитанной для температуры листьев, а не температуры воздуха. Если температура листьев и температура воздуха равны,  $\frac{w_a}{w_i}$  в точности равно относительной влажности воздуха.

Равновесное фракционирование  $\varepsilon^+$  изменяется в зависимости от температуры (Т) [4, 20, 22]. Его можно рассчитать с помощью следующего уравнения [22]:

$$\varepsilon^+(\text{‰}) = \left[ \exp \left( \frac{24.844}{(273+T)^2} \times 10^3 - \frac{76.248}{273+T} + 52.612 \times 10^{-3} \right) - 1 \right] \times 1000 \quad (3)$$

Правые части уравнений умножены на 1000, так что  $\varepsilon^+$  здесь выражен в молях.

$$\varepsilon_k(\text{‰}) = \frac{25r_s + 19r_b}{r_s + r_b} \quad (4)$$

Здесь  $r_s$  и  $r_b$  представляют собой сопротивление устьичного и пограничного слоев соответственно ( $\text{м}^2 \text{ с моль}^{-1}$ ); они являются величинами, обратными проводимостям устьиц и пограничного слоя.

Если водяной пар в воздухе находится в изотопном равновесии с исходной водой, то  $\Delta_V$  будет примерно равно  $\varepsilon^+$ . В этом случае уравнение 2 сокращается до

$$\Delta_e \approx (\varepsilon^+ + \varepsilon_k) \left(1 - \frac{w_a}{w_i}\right). \quad (5)$$

Это уравнение демонстрирует важную роль относительной влажности, поскольку относительная влажность  $\frac{w_a}{w_i}$  играет важную роль в определении изотопного обогащения воды в листе в точках испарения.

Все остальные результаты были получены с помощью расширенной модели, включающей эффект Пекле. Число Пекле определяется как

$$\gamma = \frac{LE}{cD} \quad (6)$$

и объясняет разбавление обогащенной  $^2\text{H}$  воды листа небогащенной исходной водой, которая поступает в лист через транспирационный поток ( $E$ , моль  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) и эффективна при длине пути  $L$  (установленной равной 0,03 м).  $c_{is}$  — молярная плотность воды ( $55,5 \times 10^3$  моль  $\text{m}^{-3}$ ) и  $D$  — коэффициент диффузии  $^2\text{HNO}$  в воде, зависящий от температуры:

$$D = 10^{-8} \exp\left(-0.4 + \frac{1528}{T_1} + \frac{-554368}{T_1^2}\right) (\text{m}^2\text{s}^{-1}) \quad (7)$$

Тогда общее обогащение  $^2\text{H}$  листовой воды можно рассчитать как

$$\delta H_{LW} = \frac{\Delta e(1-e^{-\gamma})}{\gamma} \quad (8)$$

$\delta H_{LW}$  меньше, чем  $\Delta_e$ , и приближается к нему при малых скоростях транспирации. В районах с высокой интенсивностью транспирации листьев, таких как высокие широты, снижение  $\Delta_e$  за счет эффекта Пекле будет выражено наиболее сильно.

Таким образом, для моделирования содержания изотопа  $\delta^2\text{H}$  в листовой воде необходимы метеорологические данные среднемесячной температуры и относительной влажности воздуха.

Используя экспериментальные данные наблюдения за температурой, рассчитывается  $\varepsilon^+$  из уравнения (3), а затем изотопное соотношение воды в листе  $\delta H_{LW}$  по формуле (8). Затем рассчитывается вариация  $\delta^2\text{H}$  в целлюлозе годичных колец с использованием формулы (1).

Включение блока, рассчитывающего содержание изотопа водорода в листовой воде и целлю-

лозе, в программном пакете LPX выполнено впервые. Нужно отметить, что в модели Родена [25] описывающей содержание изотопов кислорода и водорода в целлюлозе, механизмы обогащения изотопами схожи, различаются коэффициенты фракционирования, коэффициенты сопротивления устойчивого и пограничного слоев и ряд других параметров. Поэтому программный блок, в котором рассчитывается изотопное содержание водорода в листовой воде и целлюлозе во многом схож с блоком для расчета содержания изотопа кислорода в листовой воде и целлюлозе.

На основе инструментальных климатических данных взятых из открытых метеорологических баз, рассчитывается ежедневное содержание изотопа водорода в листовой воде, затем ежедневные данные усредняются и вычисляется среднемесячное значение. Поскольку формирование целлюлозы ограничено периодом вегетации (сезоном роста деревьев), мы используем положительную чистую первичную продукцию как весовую функцию при вычислении усредненных значений изотопного содержания в листовой воде и целлюлозе. Минимальным значением чистой первичной продукции является  $1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}/\text{месяц}$ . Это означает, что среднемесячное значение изотопа водорода в целлюлозе вычисляется только в те месяцы, когда значение чистой первичной продукции выше, чем  $1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}/\text{месяц}$ . Таким образом, месяцы с наибольшим приростом чистой первичной продукции дают больший вклад и при расчете содержания изотопа водорода в целлюлозе.

В программном пакете LPX вся поверхность земли разбивается на участки с определенным шагом по широте и долготе, на этой сетке мы выбрали участок с наиболее близкими координатами к участку исследования, координаты расчетного участка:  $67.5^\circ$  с.ш.,  $131.25^\circ$  з.д. В программном пакете LPX предписанные метеорологические данные о ежемесячной температуре, влажности, облачности, количестве дней с осадками, атмосферном  $\text{CO}_2$ . Однако, информация о температуре, влажности, облачности и осадках за период 1959 - 2020 гг. для расчетов была взята из открытых грид метеорологических данных CRU TS v. 4.07 (1901-2022) для  $68-69^\circ$  с.ш.,  $133-134^\circ$  з.д. [10], которые фикси-

ровались на близлежащей к участку метеостанции аэропорта Иннувик (Канада). Поскольку в некоторые периоды времени разница предписанных данных в программном пакете и данных с метеостанции аэропорта Иннувик (Канада) различались до 4 градусов.

Как мы уже отмечали ранее, изотопный состав источника воды ( $\delta^{18}\text{O}$ ) рассчитывался при помощи модели ECHAM5-JSBACH-wiso [19] в период 1962-2012 гг. К данным относительной влажности от ECHAM5-JSBACH применяется поправка первого порядка для учета суточного цикла. Содержание  $^{18}\text{O}$  в листовой воде определяется относительной влажностью в дневное время (когда устьица открыты), тогда как доступные данные ECHAM5-JSBACH представляют средние значения за 24 часа. Относительная влажность равномерно снижается на абсолютное значение 10 % на основе сравнения значений относительной влажности за 24 часа со средними значениями относительной влажности в летний период с 08:00 до 18:00 в умеренных и бореальных регионах). ECHAM5-JSBACH включает модель атмосферы ECHAM5 и схему земной поверхности JSBACH. Модель включает в себя три резервуара поверхностных вод: слой снега, слой воды в поверхностном слое полого или обнаженной почвы и слой почвенных вод. Каждый из этих трех пулов представлен одноуровневой моделью и каждый из них имеет заданную максимальную вместимость. Дренаж в подземные воды имеет изотопный состав почвенных вод. Никакого фракционирования при снеготаянии не предполагается. В резервуар поверхностного слоя и почвенный резервуар соответственно добавляются жидкие осадки и талая вода. После заполнения этих резервуаров остаточная вода образует сток. Для расчета эвапотранспирации в ECHAM5-JSBACH каждая ячейка сетки делится на четыре фракции покрытия: одна покрыта снегом, одна покрыта водой в поверхностном резервуаре, одна покрыта растительностью, и одна – голой почвой. Полный поток эвапотранспирации рассчитывается как взвешенная

сумма этих четырех фракций. Поверхностный слой моделируется как тонкий слой воды, который обычно полностью испаряется за несколько шагов модельного времени.

### Результаты и обсуждение

#### *Экспериментальные и модельные расчеты стабильного изотопа углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ )*

Экспериментально измеренные данные по содержанию изотопов углерода  $\delta^{13}\text{C}$  в годичных кольцах для участка Дельта Маккензи в Канаде приведены на рис. 1 для периода с 1900 по 2009 г. в сопоставлении с модельными расчетами с 1901 по 2012 г. (периода с имеющимися климатическими параметрами по сетке грид). При расчетах в модели LPX был подключен блок, учитывающий влияние вечной мерзлоты.

Снижение  $\delta^{13}\text{C}$  обусловлено влиянием антропогенного углерода (Suess-effect) [16] и соответственно была проведена дополнительная корректировка  $\delta^{13}\text{C}$  в целлюлозе годичных колец относительно  $\delta^{13}\text{C}$  атмосферного  $\text{CO}_2$ . На рис. 1 представлены уже скорректированные кривые относительно  $\delta^{13}\text{C}$  атмосферного  $\text{CO}_2$ . Измеренные и модельные значения значимо коррелируют между собой ( $r = 0.29$ ,  $p = 0.002$ ) для общего периода с 1901 по 2009 г. Разница между измеренными и модельными данными может быть объяснена необходимостью более точного подбора ряда параметров модели и их коррекции. Такими параметрами являются устьичная проводимость, глубина промерзания почвы. Вследствие отсутствия прямых измерений устьичной проводимости для данного региона исследования, мы использовали значение устьичной проводимости из литературных данных  $0.4 \text{ моль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [6, 9]. Также мы использовали глубину промерзания, предустановленную в программном пакете, и не корректировали ее, тогда как в наших предыдущих работах [6, 9] глубина промерзания почвы корректировалась в программном пакете LPX.

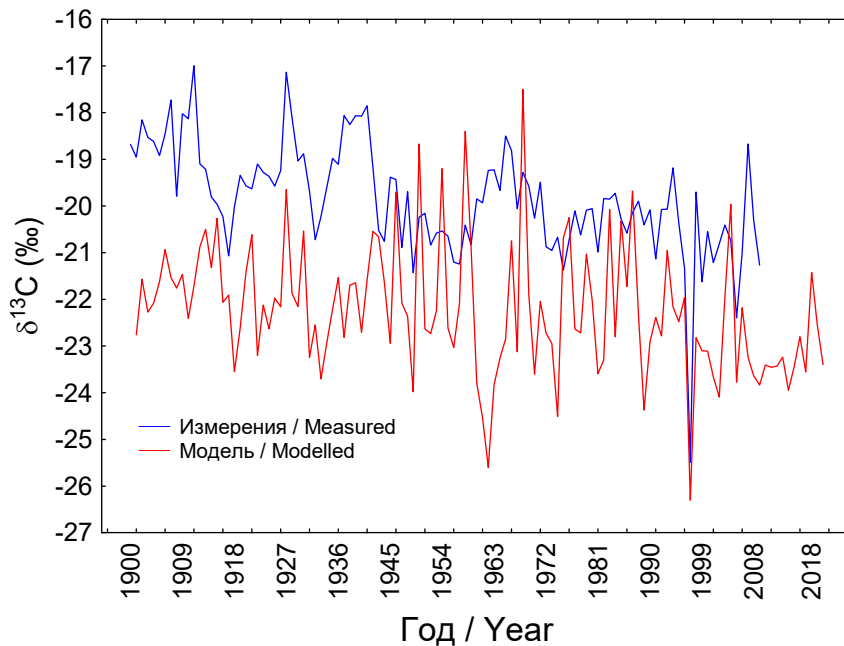


Рисунок 1. Измеренные значения стабильных изотопов углерода  $\delta^{13}\text{C}$  в годичных кольцах деревьев для участка Дельта Маккензи для периода с 1900 по 2009 г. (синяя кривая), относительно модельных  $\delta^{13}\text{C}$  расчетов для периода с 1900 по 2012 г. (красная кривая)

Figure 1. Measured values of stable carbon isotopes  $\delta^{13}\text{C}$  in annual tree rings for the Delta Mackenzie site for the period from 1900 to 2009 (blue curve), relative to the model  $\delta^{13}\text{C}$  calculations for the period from 1900 to 2012 (red curve)

*Экспериментальные и модельные расчеты стабильного изотопа кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ )*

Экспериментально измеренная вариация стабильного изотопа кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в годичных кольцах для участка Дельта Маккензии с 1900 по 2009 г. приведена на рис. 2. Там же показаны модельные данные с 1962 по 2012 г. Сравнение экспериментальных и модельных данных не позволили выявить значимых корреляционных связей (рис. 2).

В программном пакете LPX температурная зависимость равновесного фракционирования между водой и паром рассчитывается по формулам, приведенным в работе [22]. Однако, в работе [4] при расчете температурной зависимости равновесного фракционирования между водой и паром ис-

пользуются другие коэффициенты. При моделировании стабильного изотопа кислорода для участка Дельта Маккензии мы использовали оба набора коэффициентов, которые описывают температурную зависимость равновесного фракционирования между водой и паром, однако, несмотря на небольшое различие результатов, значимых корреляционных связей получить не удалось. Кроме этого, при моделировании стабильного изотопа кислорода, нам не удалось промоделировать процессы оттаивания и промерзания почвы для данного участка. Возможно, это связано с более быстрыми процессами деградации мерзлоты в Канаде, по сравнению с Сибирью [6, 9].



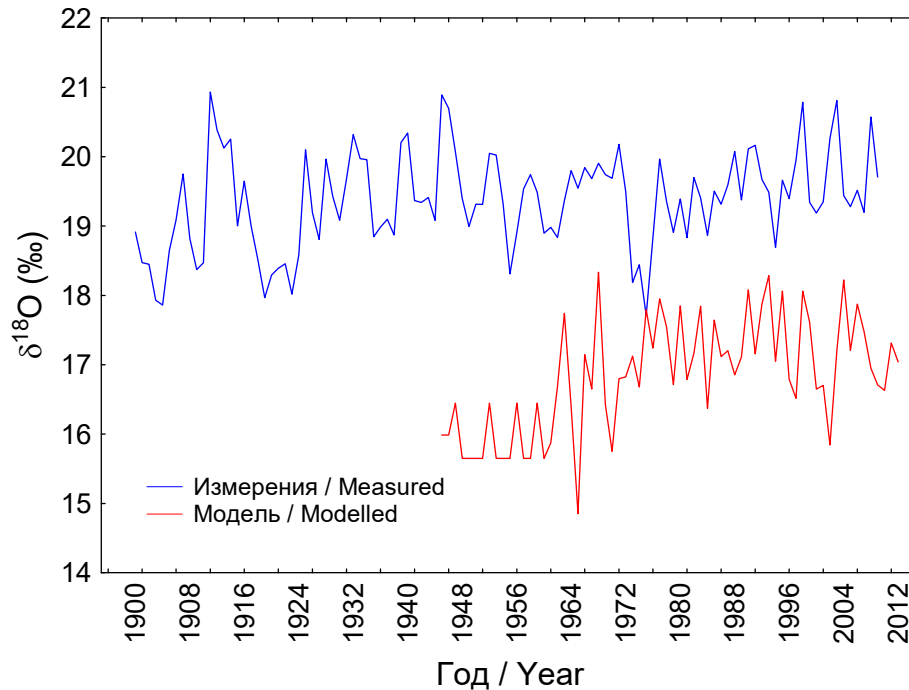


Рисунок 2. Измеренные значения стабильных изотопов углерода  $\delta^{18}\text{O}$  в годичных кольцах деревьев для участка Дельта Маккензии для периода с 1900 по 2009 г. (синяя кривая), относительно модельных  $\delta^{18}\text{O}$  расчетов для периода с 1945 по 2012 г. (красная кривая)

Figure 2. Measured values of stable carbon isotopes  $\delta^{18}\text{O}$  in annual tree rings for the Delta Mackenzie site for the period from 1900 to 2009 (blue curve), relative to the model  $\delta^{18}\text{O}$  calculations for the period from 1945 to 2012 (red curve)

Экспериментальные данные в районе исследования показывают снижение амплитуды колебаний для  $\delta^{18}\text{O}$  в годичных кольцах, что свидетельствует о влиянии дополнительного источника воды к атмосферным осадкам. Так как район исследования расположен в зоне вечной мерзлоты, такое снижение значений в последние десятилетия на фоне роста температуры воздуха может быть вызвано смешанным источником воды за счет талой мерзлотной воды. Однако, модельные значения не показывают такого снижения, что возможно обусловлено некорректным учетом вечной мерзлоты.

*Экспериментальные и модельные расчеты стабильного изотопа водорода ( $\delta^2\text{H}$ )*

Измеренные значения  $\delta^2\text{H}$  в годичных кольцах для периода с 1900 по 2009 гг. представлены на рис. 3, там же приведены рассчитанные значения содержания изотопа водорода в целлюлозе с помощью программного пакета LPX.

Как мы уже отмечали ранее изотопное соотношение в исходной воде  $\delta H_{sw}$  являлось постоянной величиной. Мы использовали в расчетах два разных значения  $\delta H_{sw}$ :  $-150\text{‰}$  и  $-160\text{‰}$ . На рис. 3 приведены результаты расчета для изотопного соотношения в исходной воде  $\delta H_{sw} = -160\text{‰}$ . Как видно из рис. 3, модельные значения согласуются с измеренными значениями, однако значимых статистических связей между измеренными  $\delta^2\text{H}$  в целлюлозе годичных колец и модельными расчетами не выявлено. При использовании значения  $\delta H_{sw} = -150\text{‰}$  модельные значения не согласуются с измеренными значениями. Используя постоянное значение изотопного соотношения в исходной воде, мы учитываем только процессы, происходящие в листе и при синтезе целлюлозы. Однако содержание изотопа водорода в целлюлозе зависит не только от процессов, происходящих в листе, но и от изменения внешних факторов окружающей среды, которые также необходимо учитывать.

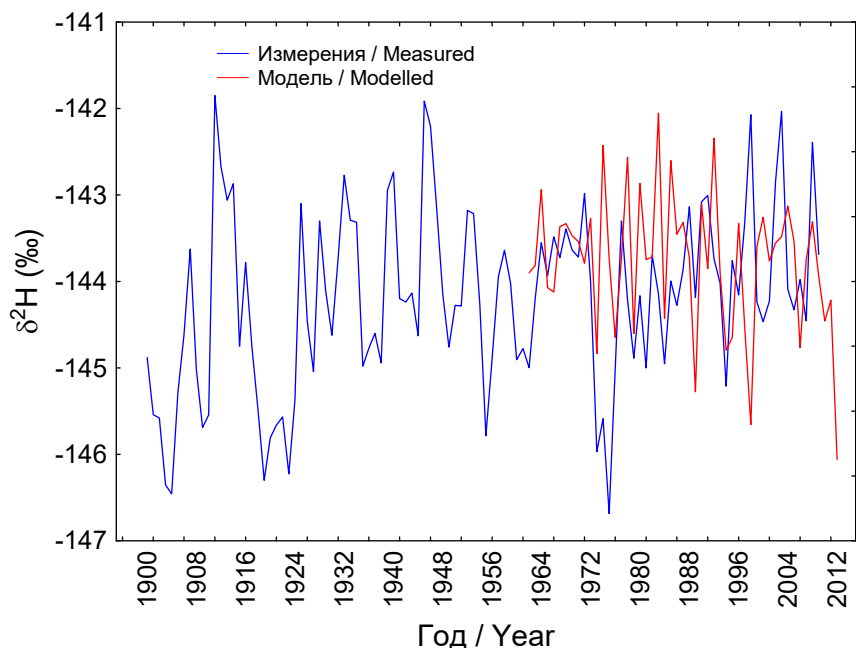


Рисунок 3. Измеренные значения  $\delta^2\text{H}$  в годичных кольцах для периода с 1900 по 2009 г. (синяя кривая) и модельные расчеты  $\delta^2\text{H}$  в целлюлозе (красная кривая) с 1962 по 2012 г.  
 Figure 3. Measured values of  $\delta^2\text{H}$  in annual rings for the period from 1900 to 2009 (blue curve, measured) and model calculations  $\delta^2\text{H}$  in cellulose (red curve, modelled) from 1962 to 2012

Прямые измерения содержания изотопов водорода и кислорода в водяном паре показывают, что их содержание изменяется не только год от года, но и в течение года. На изотопное соотношение в почвенной воде может оказать влияние, например, источник грунтовой воды или талой мерзлотной воды.

### Заключение

В данной работе представлен первый опыт расчета содержания изотопа водорода в целлюлозе, многие эффекты еще не учтены в модели, требуется дальнейшая доработка, а также корректировки ряда параметров. Заниженные значения модельных данных после 2012 г., свидетельствуют об отсутствии прямых гидрологических измерений, которые должны быть учтены в дальнейших расчетах.

Для более качественного численного моделирования вариации стабильных изотопов кисло-

рода и водорода необходимо провести моделирование изотопного состава осадков и воздуха, а также использовать эти данные в качестве входных параметров при расчете изотопной вариации кислорода и водорода в модели LPX.

При моделировании изотопного соотношения кислорода и водорода, необходимо изменить параметры в модельном блоке промерзания и оттаивания, так как деградация вечной мерзлоты и как следствие протаивание вечномерзлотных почв для Дельта р. Маккензи происходит по всей видимости быстрее, по сравнению с северо-восточной частью Сибири, где модель LPX была успешно апробирована.

Данное исследование позволило выявить слабые стороны апробации модели, которые в дальнейшем позволят улучшить качество входных данных и моделирование эко-гидрологического сигнала.

## Список литературы

1. ACIA Impacts of a warming arctic Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report, Cambridge University Press. 2004. – 140 p. - URL: <https://www.amap.no/documents/doc/impacts-of-a-warming-arctic-2004/786> (дата обращения 10.10.2023).
2. Arneeth, A. Response of central Siberian Scots pine to soil water deficit and long-term trends in atmospheric CO<sub>2</sub> concentration / A. Arneeth, J. Lloyd, H. Santruckova, M. Bird, S. Grigoryev, Y.N. Kalaschnikov, G. Gleixner, E.D.// Schulze Global Biogeochem. Cycles. - 2002. - Vol. 16(1). - P. 5-15-13. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000GB001374>
3. 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., 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, B. Kattenstroth, K. Abramova, N. Bornemann, A. Chetverova, I. Fedorova, K. Fröb, M. Grigoriev, M. Grüber, L. Kutzbach, M. Langer, M. Minke, S. Muster, K. Piel, E.M. Pfeiffer, G .Stoof, S. Westermann, K. Wischnewski, C. Wille, H.W Hubberten // Biogeosciences. – 2013. – Vol. 10(3). – P. 2105-2128. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-10-2105-2013>
4. Bottinga, Y. Oxygen isotope fractionation between CO<sub>2</sub> and water, and the isotopic composition of marine atmospheric CO<sub>2</sub> / Y. Bottinga, H. Craig // Earth and Planetary Science Letters. – 1969. – Vol. 5: - P. 285–295. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(68\)80054-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(68)80054-8)
5. Cable, J.M. Permafrost thaw affects boreal deciduous plant transpiration through increased soil water, deeper thaw and warmer soils / J.M. Cable, K. Ogle, R.W. Bolton, L.P. Bentley, V. Romanovssky, I. Hiroki, U. Harazono, J. Welker // Ecohydrology. – 2014. – Vol. 7(3). – P. 982-997. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.1423>
6. Churakova (Sidorova), O.V. Measured and modelled source water δ<sup>18</sup>O based on tree-ring cellulose of larch and pine trees from the permafrost zone. / O.V. Churakova (Sidorova), S. Lienert, G. Timofeeva, R. Siegwolf, J. Roden, F. Joos, M. Saurer // Forest. Biogeosciences and Forestry. – 2020. – Vol.13. – P. 224-229. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3212-013>.
7. Churakova (Sidorova), O.V. Towards the third millennium changes in Siberian triple tree-ring stable isotopes / O.V. Churakova (Sidorova), M.V. Fonti, V.V. Barinov, M.S. Zharkov, A.V. Taynik, T.V. Trushkina, A.V. Kirdyanov, A. Arzac, M. Saurer // Forests. – 2022. – Vol. 13(6). - P.934. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060934>.
8. Churakova (Sidorova), O.V.. Climate impacts on tree-ring stable isotopes across the boreal zone / O.V. Churakova (Sidorova), T.J. Porter, M.S. Zharkov, M.V. Fonti, V.V. Barinov, A.V. Taynik, A.V. Kirdyanov, A.A. Knorre, M. Wegmann, T.V. Trushkina, N.N. Koshurnikova, E.A. Vaganov, V.S. Myglan, R.T.W. Siegwolf, M. Saurer // Science of the Total Environment. – 2023. Vol. 870. – P.161644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161644>
9. Churakova (Sidorova), O.V. Application of eco-physiological models to the climatic interpretation of δ<sup>13</sup>C and δ<sup>18</sup>O measured in Siberian larch tree-rings / O.V. Churakova (Sidorova), A.V. Shashkin, R.T.W. Siegwolf, R. Spahni, T. Launois, M. Saurer, M.V. Bryukhanova, A.V. Benkova, A.V. Kuptsova, P. Peylin, E.A. Vaganov, V. Masson-Delmotte, J. Roden // Dendrochronologia. – 2016. – Vol. 39. – P. 51-59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.12.008>.
10. Climatic Research Unit : Data. High-resolution gridded datasets (and derived products) (2023). URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/> (дата обращения 10.10.2023).
11. Dansgaard, W. Stable isotopes in precipitation / W. Dansgaard // Tellus. – 1964. – Vol. 16(4). – P. 436-468. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
12. Dongmann, G. On the enrichment of <sup>2</sup>H<sup>18</sup>O in the leaves of transpiring plants / G. Dongmann, H.W. Nurnberg, H. Förstel, K. Wagener // Radiation and Environmental Biophysics. – 1974. – Vol. 11. – P. 41–52. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01323099>.

13. Farquhar, G.D. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency / G.D. Farquhar, K.T. Hubick, A.G. Condon, R.A. Richards // *Stable Isotopes in Ecological Research*, Springer-Verlag, New York. – 1989. P. 21-40. Режим доступа: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-3498-2\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-3498-2_2)
14. Farquhar, G.D. Carbon and oxygen isotope effects in the exchange of carbon dioxide between terrestrial plants and the atmosphere / G.D. Farquhar, J. Lloyd // *In Stable Isotopes and Plant Carbon–Water Relations*. – 1993. – P. 47–70. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080918013500118>
15. Flanagan, L.B. Comparison of modeled and observed environmental influences on the stable oxygen and hydrogen isotope composition of leaf water in *Phaseolis vulgaris* / L.B. Flanagan, J.P. Comstock, J.R. Ehleringer // *Plant Physiology*. – 1991. – Vol. 96. – P. 588–596. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.96.2.588>
16. Francey, R.J., *et al.* A 1000-year high precision record of  $\delta^{13}\text{C}$  in atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. – 1999. Vol, 51. P. 170-193. DOI: [10.1034/j.1600-0889.1999.t01-1-00005.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1999.t01-1-00005.x)
17. Fyodorov-Davydov, D.G. Seasonal thaw of soils in the North Yakutian ecosystems / D.G. Fyodorov-Davydov, V.E. Kholodov, G.N. Kraev, V.A. Sorokovikov, S.P. Davydov, A.A. Merekalova // *In: V International Conference on Cryopedology Diversity of forest affected soils and their role in ecosystems*. At Ulan-Ude, Buryatia, Russia, September. – 2009. – P. 14–20.
18. Gerten, D. Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model / D. Gerten, S. Schaphoff, U. Haberlandt, W. Lucht, S. Sitch // *Journal of Hydrology*. – 2004. – Vol. 286(1-4). – P. 249-270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.029>.
19. Haese, B. Stable water isotopes in the coupled atmosphere–land surface model ECHAM5-JSBACH Geosci / B. Haese, M. Werner, G. Lohmann // *Model Dev.* – 2013. – Vol. 6. – P. 1463–1480. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1463-2013>
20. Horita, J. Liquid–vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature / J. Horita, D.J. Wesolowski // *Geochimica Et Cosmochimica Acta*. – 1994. – Vol. 58. – P. 3425–3437. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90096-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90096-5)
21. Keel, S.G. Simulating oxygen isotope ratios in tree ring cellulose using a dynamic global vegetation model / S.G. Keel, F. Joos, R. Spahni, M. Saurer, R.B. Weigt, S. Klesse // *Biogeosciences*. – 2016. – Vol. 13. – P. 3869–3886. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-13-3869-2016>
22. Majoube, M. Fractionnement en oxygen-18 et en deuterium entre l'eau et sa vapeur / M. Majoube // *Journal de Chimie et Physique*. – 1971. – Vol. 68. – P. 1423–1436. DOI: <https://doi.org/10.1051/jcp/1971681423>
23. Pachauri R.K., Meyer L.A. IPCC 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland. – 2014. – pp. 151. Режим доступа: <https://epic.awi.de/id/eprint/37530/>
24. Richardson, C.W. Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation / C.W. Richardson // *Water Resources Research*. – 1981. – Vol. 17(1). – P. 182-190. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR017i001p00182>
25. Roden, J.S. Hydrogen and oxygen isotope ratios of tree ring cellulose for field-grown riparian trees / J.S. Roden, J.R. Ehleringer // *Oecologia*. – 2000. – Vol. 123. – P. 481–489. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420000349>
26. Saurer, M. Spatial and temporal oxygen isotope trends at the northern tree-line in Eurasia / M. Saurer, F. Schweingruber, E.A. Vaganov, S.G. Schiyatov, R. Siegwolf // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – Vol. 29(9). – P. 7-1-7-4. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GL013739>
27. Sitch, S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model / S. Sitch, B. Smith, I.C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J.O. Kaplan, S. Levis, W. Lucht, M.T. Sykes, K. Thonicke, S. Venevsky // *Global Change Biology*. – 2003. – Vol. 9(2). – P. 161-185. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x>

28. Spahni, R. Transient simulations of the carbon and nitrogen dynamics in northern peatlands: from the Last Glacial Maximum to the 21st century / R. Spahni, F. Joos, B.D. Stocker, M. Steinacher, Z.C. Yu // *Clim. Past.* – 2013. – Vol. 9. – P. 1287-1308. DOI: <https://doi.org/10.5194/cp-9-1287-2013>
29. Srikanthan, R. Comparison of two approaches for generation of daily rainfall data / R. Srikanthan, T.I. Harrold, A. Sharma, T.A. McMahon // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.* – 2005. – Vol. 19. – P. 215–226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-004-0226-0>
30. Stocker, B.D. Multiple greenhouse-gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios / B.D. Stocker, R. Roth, F. Joos, R. Spahni, M. Steinacher, S. Zaehle, L. Bouwman, Xu-Ri, I.C. Prentice // *Nat. Clim. Change.* – 2013. – Vol. 3.- P. 666-672. DOI:10.1038/nclimate1864
31. Importance of permafrost as a source of water for plants in east Siberian taiga / A.N. Sugimoto, N. Yanagisawa, N. Fujita, T.S. Maximov, D. Naito // *Ecol. Res.* – 2002. – Vol. 17(4). – P. 493-503. DOI:10.1046/j.1440-1703.2002.00506.x
32. Vaganov, E.A. Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments / E.A. Vaganov, M.K. Hughes, A.V. Shashkin. Springer, 2006. 353 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-31298-6>.
33. Wania, R.I. Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: 1. Evaluation and sensitivity of physical land surface processes / R.I. Wania, I.C. Ross // *Global Biogeochemical Cycles.* – 2009. – Vol. 23(3). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GB003412>.

### References

1. ACIA Impacts of a warming arctic Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report, Cambridge University Press. 2004. – 140 p. - URL: <https://www.amap.no/documents/doc/impacts-of-a-warming-arctic-2004/786> (date of the application 10.10.2023).
2. Arneth, A. Response of central Siberian Scots pine to soil water deficit and long-term trends in atmospheric CO<sub>2</sub> concentration / A. Arneth, J. Lloyd, H. Santruckova, M. Bird, S. Grigoryev, Y.N. Kalaschnikov, G. Gleixner, E.D.// *Schulze Global Biogeochem. Cycles.* - 2002. – Vol. 16(1). - P. 5-15-13. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000GB001374>
3. 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., 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, B. Kattenstroth, K. Abramova, N. Bornemann, A. Chetverova, I. Fedorova, K. Fröb, M. Grigoriev, M. Grüber, L. Kutzbach, M. Langer, M. Minke, S. Muster, K. Piel, E.M. Pfeiffer, G .Stoof, S. Westermann, K. Wischnewski, C. Wille, H.W Hubberten // *Biogeosciences.* – 2013. – Vol. 10(3). – P. 2105-2128. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-10-2105-2013>
4. Bottinga, Y. Oxygen isotope fractionation between CO<sub>2</sub> and water, and the isotopic composition of marine atmospheric CO<sub>2</sub> / Y. Bottinga, H. Craig // *Earth and Planetary Science Letters.* – 1969. – Vol. 5: - P. 285–295. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(68\)80054-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(68)80054-8)
5. Cable, J.M. Permafrost thaw affects boreal deciduous plant transpiration through increased soil water, deeper thaw and warmer soils / J.M. Cable, K. Ogle, R.W. Bolton, L.P. Bentley, V. Romanovssky, I. Hiroki, U. Harazono, J. Welker // *Ecohydrology.* – 2014. – Vol. 7(3). – P. 982-997. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.1423>
6. Churakova (Sidorova), O.V. Measured and modelled source water δ<sup>18</sup>O based on tree-ring cellulose of larch and pine trees from the permafrost zone. / O.V. Churakova (Sidorova), S. Lienert, G. Timofeeva, R. Siegwolf, J. Roden, F. Joos, M. Saurer // *Forest. Biogeosciences and Forestry.* – 2020. – Vol.13. – P. 224-229. DOI: <https://doi:10.3832/ifor3212-013>.
7. Churakova (Sidorova), O.V. Towards the third millennium changes in Siberian triple tree-ring stable isotopes / O.V. Churakova (Sidorova), M.V. Fonti, V.V. Barinov, M.S. Zharkov, A.V. Taynik, T.V. Trushkina,

- A.V. Kirdeyanov, A. Arzac, M. Saurer // *Forests*. – 2022. – Vol. 13(6). – P. 934. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060934>
8. Churakova (Sidorova), O.V.. Climate impacts on tree-ring stable isotopes across the boreal zone / O.V. Churakova (Sidorova), T.J. Porter, M.S. Zharkov, M.V. Fonti, V.V. Barinov, A.V. Taynik, A.V. Kirdeyanov, A.A. Knorre, M. Wegmann, T.V. Trushkina, N.N. Koshurnikova, E. A.Vaganov, V.S. Myglan, R.T.W. Siegwolf, M. Saurer // *Science of the Total Environment*. – 2023. Vol. 870. – P. 161644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161644>.
9. Churakova (Sidorova), O.V. Application of eco-physiological models to the climatic interpretation of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  measured in Siberian larch tree-rings / O.V. Churakova (Sidorova), A.V. Shashkin, R.T.W. Siegwolf, R. Spahni, T. Launois, M. Saurer, M.V. Bryukhanova, A.V. Benkova, A.V. Kuptsova, P. Peylin, E.A. Vaganov, V. Masson-Delmotte, J. Roden // *Dendrochronologia*. – 2016. – Vol. 39. – P. 51-59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.12.008>.
10. Climatic Research Unit : Data. High-resolution gridded datasets (and derived products) (2023). URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/> (date of the application 10.10.2023).
11. Dansgaard, W. Stable isotopes in precipitation / W. Dansgaard // *Tellus*. – 1964. – Vol. 16(4). – P. 436-468. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
12. Dongmann, G. On the enrichment of  $^2\text{H}^{18}\text{O}$  in the leaves of transpiring plants / G. Dongmann, H.W. Nurnberg, H. Förstel, K. Wagener // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 1974. – Vol. 11. – P.41–52. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01323099>
13. Farquhar, G.D. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency / G.D. Farquhar, K.T. Hubick, A.G. Condon, R.A. Richards // *Stable Isotopes in Ecological Research*, Springer-Verlag, New York. – 1989. P. 21-40. Режим доступа: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-3498-2\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-3498-2_2)
14. Farquhar, G.D. Carbon and oxygen isotope effects in the exchange of carbon dioxide between terrestrial plants and the atmosphere / G.D. Farquhar, J. Lloyd // *In Stable Isotopes and Plant Carbon–Water Relations*. – 1993. – P. 47–70. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080918013500118>
15. Flanagan, L.B. Comparison of modeled and observed environmental influences on the stable oxygen and hydrogen isotope composition of leaf water in *Phaseolis vulgaris* / L.B. Flanagan, J.P. Comstock, J.R. Ehleringer // *Plant Physiology*. – 1991. – Vol. 96. – P. 588–596. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.96.2.588>
16. Francey, R.J., *et al.* A 1000-year high precision record of  $\delta^{13}\text{C}$  in atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. – 1999. Vol. 51. P. 170-193. DOI: [10.1034/j.1600-0889.1999.t01-1-00005.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1999.t01-1-00005.x)
17. Fyodorov-Davydov, D.G. Seasonal thaw of soils in the North Yakutian ecosystems / D.G. Fyodorov-Davydov, V.E. Kholodov, G.N. Kraev, V.A. Sorokovikov, S.P. Davydov, A.A. Merekalova // *In: V International Conference on Cryopedology Diversity of forest affected soils and their role in ecosystems*. At Ulan-Ude, Buryatia, Russia, September. – 2009. – P. 14–20.
18. Gerten, D. Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model / D. Gerten, S. Schaphoff, U. Haberlandt, W. Lucht, S. Sitch // *Journal of Hydrology*. – 2004. – Vol. 286(1-4). – P. 249-270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.029>.
19. Haese, B. Stable water isotopes in the coupled atmosphere–land surface model ECHAM5-JSBACH Geosci / B. Haese, M. Werner, G. Lohmann // *Model Dev*. – 2013. – Vol. 6. – P. 1463–1480. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1463-2013>.
20. Horita, J.. Liquid–vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature / J. Horita, D.J. Wesolowski // *Geochimica Et Cosmochimica Acta*. – 1994. – Vol. 58. – P. 3425–3437. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90096-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90096-5)

21. Keel, S.G. Simulating oxygen isotope ratios in tree ring cellulose using a dynamic global vegetation model / S.G. Keel, F. Joos, R. Spahni, M. Saurer, R.B. Weigt, S. Klesse // *Biogeosciences*. – 2016. – Vol. 13. – P. 3869–3886. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-13-3869-2016>
22. Majoube, M. Fractionnement en oxygène-18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur / M. Majoube // *Journal de Chimie et Physique*. – 1971. – Vol. 68. – P. 1423–1436. DOI: <https://doi.org/10.1051/jcp/1971681423>
23. Pachauri R.K., Meyer L.A. IPCC 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland. – 2014. – pp. 151. Режим доступа: <https://epic.awi.de/id/eprint/37530/>
24. Richardson, C.W. Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation / C.W. Richardson // *Water Resources Research*. – 1981. – Vol. 17(1). – P. 182–190. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR017i001p00182>
25. Roden, J.S. Hydrogen and oxygen isotope ratios of tree ring cellulose for field-grown riparian trees / J.S. Roden, J.R. Ehleringer // *Oecologia*. – 2000. – Vol. 123. – P. 481–489. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420000349>
26. Saurer, M. Spatial and temporal oxygen isotope trends at the northern tree-line in Eurasia / M. Saurer, F. Schweingruber, E.A. Vaganov, S.G. Schiyatov, R. Siegwolf // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – Vol. 29(9). – P. 7-1-7-4. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GL013739>
27. Sitch, S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model / S. Sitch, B. Smith, I.C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J.O. Kaplan, S. Levis, W. Lucht, M.T. Sykes, K. Thonicke, S. Venevsky // *Global Change Biology*. – 2003. – Vol. 9(2). – P. 161–185. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x>
28. Spahni, R. Transient simulations of the carbon and nitrogen dynamics in northern peatlands: from the Last Glacial Maximum to the 21st century / R. Spahni, F. Joos, B.D. Stocker, M. Steinacher, Z.C. Yu // *Clim. Past*. – 2013. – Vol. 9. – P. 1287–1308. DOI: <https://doi.org/10.5194/cp-9-1287-2013>
29. Srikanthan, R. Comparison of two approaches for generation of daily rainfall data / R. Srikanthan, T.I. Harrold, A. Sharma, T.A. McMahon // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. – 2005. – Vol. 19. – P. 215–226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-004-0226-0>
30. Stocker, B.D. Multiple greenhouse-gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios / B.D. Stocker, R. Roth, F. Joos, R. Spahni, M. Steinacher, S. Zaehle, L. Bouwman, Xu-Ri, I.C. Prentice // *Nat. Clim. Change*. – 2013. – Vol. 3. – P. 666–672. DOI: [10.1038/nclimate1864](https://doi.org/10.1038/nclimate1864)
31. Importance of permafrost as a source of water for plants in east Siberian taiga / A.N. Sugimoto, N. Yanagisawa, N. Fujita, T.S. Maximov, D. Naito // *Ecol. Res*. – 2002. – Vol. 17(4). – P. 493–503. DOI: [10.1046/j.1440-1703.2002.00506.x](https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2002.00506.x)
32. Vaganov, E.A. Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments / E.A. Vaganov, M.K. Hughes, A.V. Shashkin. // Springer, 2006. – pp. 353. DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-31298-6>
33. Wania, R.I. Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: 1. Evaluation and sensitivity of physical land surface processes / R.I. Wania, I.C. Ross // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2009. – Vol. 23(3). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GB003412>

### Сведения об авторах

*Васильева Наталья Дмитриевна* – инженер Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН - обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50, г. Красноярск, Российская Федерация, 660036, Сибирский Федеральный Университет, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2821-5159>, e-mail: [tusa3105@mail.ru](mailto:tusa3105@mail.ru).

*Софронова Светлана Николаевна* – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН - обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50,

г. Красноярск, Российская Федерация, 660036, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3486-9874>, e-mail: [sofronova\\_77@mail.ru](mailto:sofronova_77@mail.ru).

*Баринов Валентин Викторович* – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Сибирской дендрохронологической лаборатории, ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», пр. Свободный, 79, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3582-3440>, e-mail: [vvbarinov@sfu-kras.ru](mailto:vvbarinov@sfu-kras.ru).

*Тайник Анна Владимировна* – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Сибирской дендрохронологической лаборатории, ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», пр. Свободный, 79, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7441-6947>, e-mail: [ataynik@sfu-kras.ru](mailto:ataynik@sfu-kras.ru).

*Трушкина Татьяна Владимировна* – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, просп. имени Газеты Красноярский Рабочий, 31, стр. 5, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5585-0286>, [Trushkinatv@sibsau.ru](mailto:Trushkinatv@sibsau.ru).

*Чуракова Ольга Владимировна* – доктор биол., наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии лесных экосистем, ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет», Институт экологии и географии, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1687-1201>, e-mail: [ochurakova@sfu-kras.ru](mailto:ochurakova@sfu-kras.ru).

### Information about the authors

*Nataliya D. Vasilieva* – engineer, L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS and Siberian Federal University – part of FSC KSC SB RAS, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660036, ORCID:<https://orcid.org/0009-0000-2821-5159>; e-mail: [tusa3105@mail.ru](mailto:tusa3105@mail.ru).

*Svetlana N. Sofronova* – Cand. Sci. (physics), leading scientists, Docent, L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS – part of FSC KSC SB RAS, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660036, and Siberian Federal University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3486-9874>, e-mail: [ssn@iph.krasn.ru](mailto:ssn@iph.krasn.ru).

*Valentin V. Barinov* – Cand. Sci. (biology), Scientist, Siberian dendrochronological Laboratory, Siberian Federal University, Svobodny, 79, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3582-3440>, e-mail: [vvbarinov@sfu-kras.ru](mailto:vvbarinov@sfu-kras.ru).

*Anna V. Taynik* – Cand. Sci. (biology), Scientist, Siberian dendrochronological Laboratory, Siberian Federal University, Svobodny, 79, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7441-6947>, e-mail: [ataynik@sfu-kras.ru](mailto:ataynik@sfu-kras.ru).

*Tatyana V. Trushkina* – Cand. Sci. (Techn.), Docent, M.F. Reshetnev Siberian University of Science and Technologies, Krasnoyarsk Worker Newspaper Ave., 31, p. 5, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, <https://orcid.org/0000-0002-5585-0286>, e-mail: [Trushkinatv@sibsau.ru](mailto:Trushkinatv@sibsau.ru)

*Olga V. Churakova* – corresponding author. Cand. Sci (biology), Habil. (biology), leading scientists, Laboratory of biogeochemistry forest ecosystems, Institute of ecology and geography, Siberian Federal University, Svobodny, 79, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1687-1201>, e-mail: [ochurakova@sfu-kras.ru](mailto:ochurakova@sfu-kras.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author