УДК 581.526.426.4:550.47 DOI 10.15372/SEJ20220306

# Многолетние вариации δ<sup>13</sup>С в целлюлозе годичных колец деревьев на территории Обь-Томского междуречья

А. Н. МАРКЕЛОВА, Г. В. СИМОНОВА, Д. А. КАЛАШНИКОВА, Ю. В. ВОЛКОВ

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН 634055, Томск, просп. Академический, 10/3 E-mail: annanikmark@rambler.ru

> Статья поступила 25.12.2021 После доработки 28.12.2021 Принята к печати 30.12.2021

# АННОТАЦИЯ

Выполнен анализ многолетних изменений значений  $\delta^{13}$ С в целлюлозе годичных колец деревьев на двух участках леса на территории Обь-Томского междуречья. На первом участке обнаружено ожидаемое снижение значений  $\delta^{13}$ С, но со скоростью, выше глобальной на 0,16–0,2 ‰/10 лет. На втором участке, расположенном в 20 м от болота, происходило постепенное увеличение значений  $\delta^{13}$ С до 1978 г., затем снижение со скоростью такой же, как и на первом участке, 0,2 ‰/10 лет. Мы полагаем, изменения  $\delta^{13}$ С целлюлозы деревьев на втором участке отражают динамику значений  $\delta^{13}$ С СО<sub>2</sub> на болоте. Причиной изменений динамики после 1978 г., вероятно, является влияние Томского подземного водозабора, приведшее к обсыханию болота и, соответственно, снижению величины  $\delta^{13}$ С в СО<sub>2</sub>.

Ключевые слова: Larix sibirica, Pinus sylvestris,  $\delta^{13}$ С, изотопы углерода, индикация биогеохимических процессов, Западная Сибирь.

Обь-Томское междуречье и прилегающие территории относятся к регионам с богатым природоресурсным потенциалом и с относительно комфортными природно-климатическими условиями для проживания людей. Такие территории, как правило, испытывают антропогенные нагрузки разной степени тяжести, которые со временем только возрастают. Одним из наиболее значимых антропогенных факторов, определяющих здесь экологическую обстановку, является эксплуатация месторождения подземных вод.

Первые скважины Томского водозабора введены в эксплуатацию в 1972 г., с того времени их количество возросло до 198 [Состояние..., 2018]. Интенсивная откачка подземных вод привела к гидрологическим и геохимическим изменениям и повлияла на функционирование ряда биогеосистем Обь-Томского междуречья. В водоносных горизонтах сформировалась воронка депрессии, ее площадь распространяется почти на всю территорию междуречья. Глубина сработки водоносных горизонтов скважин первой очереди водозабора составляет 9-10 м, по отдельным скважинам - до 15 м [Попов и др., 2002]. К началу 1980-х годов произошло понижение уровня грунтово-болотных вод, так как пополнение запасов эксплуатируемых подземных вод осуществляется за счет инфильтрации из вышележащих горизонтов [Состояние..., 2018]. Это привело к изменениям ряда биогеоценозов,

<sup>©</sup> Маркелова А. Н., Симонова Г. В., Калашникова Д. А., Волков Ю. В., 2022

проявившихся особенно заметно в заболоченных лесах, мелкозалежных болотах, участках с транзитными потоками влаги. Основные из них связаны со значительным обсыханием ландшафтов, которое привело к изменениям в структуре растительного покрова и увеличению частоты возникновения пожаров [Дюкарев, Пологова, 20116]. Чем ближе расположение данных биогеоценозов к скважинам первой очереди, тем сильнее выражены изменения [Дюкарев, Пологова, 20116].

В торфяных залежах болот и заболоченных лесов депонируется большое количество углерода, а при их осушении они становятся источниками его эмиссии в атмосферу в виде метана и диоксида углерода за счет интенсификации процессов разложения торфа. Мы предполагаем, что работа томского водозабора могла повлиять на потоки углерода в атмосферу с болот, расположенных вблизи скважин. В отсутствие прямых измерений такое влияние можно выявить и получить некоторые его количественные характеристики с помощью изотопных методов индикации. Они основаны на различиях в соотношениях стабильных изотопов углерода в разных компонентах биогеоценозов, а именно в системе "атмосфера - растение - почва" [Zhu et al., 2019]. Одним из таких методов является изотопная дендрохроноиндикация. Она имеет свои преимущества и недостатки. Самое большое преимущество метода в том, что с его помощью можно в ретроспективе отслеживать изменения концентрации и изотопного состава углерода в атмосфере; смену источников эмиссий СО2 в атмосферу, если их изотопные характеристики ( $\delta^{13}C_{CO_2}$ ) отличаются; влияние разных факторов на газообмен СО<sub>2</sub> в биогеосистемах [Savard et al., 2004]. Основной недостаток - сложность получения нужной информации, так как изотопные древесно-кольцевые хронологии интегрируют в себе информацию о многих процессах в окружающей среде и внутри самих деревьев. Следовательно, изучение особенностей формирования изотопного состава углерода в компонентах древесины годичных колец (чаще всего это целлюлоза) актуально и необходимо для оценки информативности изотопных хронологий, относящихся к местообитаниям с разными экологическими и гидроклиматическими условиями.

Цель данной работы – выявить особенности многолетней и погодичной изменчивости  $\delta^{13}$ С значений в целлюлозе годичных колец деревьев в условиях сомкнутых древостоев подтайги на территории Обь-Томского междуречья и оценить потенциал  $\delta^{13}$ С хронологий для индикации и оценки изменений в углеродных потоках биогеоценозов, вызванных влиянием Томского водозабора.

### материал и методы

Обь-Томское междуречье расположено на юге Западно-Сибирской равнины. Климат данной территории умеренно континентальный, характеризуется продолжительной морозной зимой, коротким теплым летом и короткими переходными сезонами с неустойчивой погодой. Согласно данным метеостанции Томск (29430) [Булыгина и др., 2014] среднегодовая температура воздуха составляет 1 °С. Самый холодный месяц года – январь; самый теплый - июль, со среднемесячными температурами -17,7 и 18,9 °С соответственно. Среднегодовая сумма осадков 606 мм. Осадки в течение года распределены неравномерно. На период с мая по сентябрь приходится примерно половина от годовой суммы.

Обь-Томское междуречье – слабо расчлененная ложбинами древнего стока денудационно-аккумулятивная равнина, ограниченная с востока р. Томью, с Запада – р. Обью, с юга – р. Большой Черной. Относительная высота изменяется от 110–190 м над уровнем моря [Хромых, 1997]. Ложбины древнего стока заполнены песчаными и супесчаными отложениями, которые формируют плосковолнистый рельеф с гривно-ложбинными участками с перепадами высот до 8–14 м. Террасово-долинный комплекс Оби и Томи образован фрагментами первой и второй террас и пойм [Дюкарев, Пологова, 2011а].

Территория междуречья расположена в подтайге. На равнине в основном распространены вторичные березовые и осиново-березовые леса, также сохранились небольшие островки коренных сосново-березовых травяных лесов, произрастающих преимущественно на серых лесных почвах и их полугидроморфных аналогах. На песчаных гривах ложбин древнего стока небольшими участками сохранились коренные сосновые лишайниковые, зеленомошно-лишайниковые, зеленомошные и бруснично-зеленомошные леса на подзолистых иллювиально-железистых почвах, сосняки зеленомошно-разнотравные и осочково-разнотравные леса на дерново-подзолистых и дерновых альфегумусовых почвах [Дюкарев, Пологова, 2009, 2011а]. На первых надпойменных террасах Оби и Томи распространены смешанные заболоченные сосново-кедрово-елово-березовые леса на дерново-глеевых и светло-серых глееватых почвах. Значительную их территорию занимают евтрофные болота. На более дренированных вторых террасах произрастают сосново-березовые крупнотравные леса на светло-серых и серых лесных почвах [Дюкарев, Пологова, 2011а].

Для сбора образцов выбраны два участка леса – TMCH-51 и TMV-53, приуроченные к возвышенным участкам ложбин древнего стока, сложенным песчаными отложениями. Благодаря хорошей дренированности выбранных участков единственным источником влаги для роста деревьев являются атмосферные осадки, следовательно, изотопный состав древесины максимально связан с процессами, происходящими в атмосфере.

ТМСН-51 (56,45953° с. ш., 84,75590° в. д.) представляет собой сосняк разнотравно-зеленомошный с единичными деревьями березы и лиственницы сибирской. Сосновый древостой образован двумя поколениями деревьев, средний возраст которых составляет 210 и 90 лет. Подлесок редкий, состоит из рябины и караганы. На участке ранее были выявлены четыре рубки [Маркелова и др., 2019]. Три довольно крупных 1842/43 г., 1936/37 г., 1955/56 г. и одна выборочная 1985/86 г. Данный участок леса расположен в 6,2 км от скважин первой очереди водозабора.

ТМV-53 (56,46073° с. ш., 84,86604° в. д.) – чистый сосняк-зеленомошник. Древостой одновозрастный, средний возраст деревьев составляет 140 лет. На территории, где расположен ТМV-53, запрещены все виды лесопользования, кроме рекреационного и сбора дикоросов. Кратковременных событий, нарушающих естественное развитие древостоя, таких как рубки, пожары, вспышки численности насекомых-вредителей, обнаружено не было. Участок леса ТМV-53 находится в 50 м от скважины водозабора, в 20 м от участка у подножия склона суходола расположено Тимирязевское болото переходного типа.

В пределах выбранных участков леса выбрано по 15-20 деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разного диаметра, но занимающих доминирующее положение в древостое. У каждого дерева на высоте 110-130 см возрастным буравом взято по 2-5 кернов. На участке TMCH-51 также были взяты спилы с упавшего дерева лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.). Всего отобрано 85 кернов и один спил.

В лаборатории керны и спилы сушили на воздухе при комнатной температуре, затем их поверхности зачищали с помощью скальпеля. Вдоль каждого керна и четырех радиусов спилов измеряли ширину годичных колец с помощью измерительного комплекса LINTAB с программным пакетом TSAP [Rinn, 1996]. Таким образом, для каждого участка получена выборка, состоящая из индивидуальных рядов радиального прироста деревьев или индивидуальных хронологий [Ваганов и др., 1996]. Индивидуальные хронологии были перекрестно датированы в программе COFECHA [Holmes, 1992], затем из них удалялись возрастные кривые, т.е. получены стандартные индивидуальные хронологии. Для каждой стандартной индивидуальной хронологии рассчитан критерий согласованного поведения с другими стандартными хронологиями выборки. Этот критерий показывает степень синхронности изменений сравниваемых хронологий. Вычисляется он следующим образом: для каждого ряда рассчитываются спектры Фурье, затем в каждом спектре определяется доля коэффициентов одной частоты с одинаковыми знаками. Величина критерия изменяется от 0 до 1. Подробно алгоритм его расчета изложен в работе [Маркелова и др., 2012]. Из выборок были исключены все индивидуальные хронологии с величиной критерия меньше 0,7. Оставшиеся хронологии использовались для построения обобщенных локальных хронологий ширины годичных колец (ШГК-хронологий): ШГК-ТМСН-51 и ШГК-ТМV-53, в программе ARSTAN [Cook et al., 1990].

Для изотопного анализа подготовлены два набора проб. Для участка TMCH-51 спил лиственницы был разделен на отдельные годичные слои. Для участка TMV-53 подготовлен набор смешанных проб из кернов сосны.

Выбор материала для последующей пробоподготовки осуществлялся в несколько этапов. На первом выбраны керны деревьев одного возраста, близких по высоте и диаметру ствола. На втором этапе для каждого дерева сосны по индивидуальным хронологиям графическим способом определены границы этапов возрастного развития [Николаева, Савчук, 2009]. Были выбраны керны деревьев, у которых переходы от одного возрастного периода к другому происходили синхронно. Участки кернов, соответствующие ювенильному периоду, из анализа исключались во избежание появления возможного возрастного тренда в изотопных хронологиях. На третьем этапе выбраны керны, стандартные индивидуальные хронологии которых имеют величину критерия согласованного поведения, равную или выше 0,7. Отобранные керны были разделены на годичные слои, древесина которых объединялась в соответствии с годом образования в смешанную пробу в соответствии с методом [Borella et al., 1998]. Из проб древесины были получены пробы целлюлозы азотнокислым методом [Оболенская, Ельницкая 1991].

Отношения стабильных изотопов углерода определяли в целлюлозе с помощью изотопного масс-спектрометра DELTA V (Thermo Fisher Scientific, Германия) в центре коллективного пользования (ТомЦКП СО РАН). Результаты измерений выражены в виде отклонений от стандарта (‰) VPDB:

$$\delta^{13} \mathbf{C} = \left[ \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right] \cdot 1000, \tag{1}$$

где  $R_{\text{sample}}$  и  $R_{\text{standard}}$  – отношение <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C в исследуемом образце и стандарте соответственно. Ошибка измерений составляет ±0,1 ‰. Временные последовательности измеренных  $\delta^{13}{\rm C}$  значений целлюлозы годичных колец сосны обыкновенной и лиственницы сибирской далее обозначены соответственно как  $\delta^{13}{\rm C}_{\rm or}$ -TMV-53 и  $\delta^{13}{\rm C}_{\rm or}$ -TMCH-51 ряды или хронологии (рис. 1).

ШГК-ТМСН-51 и ШГК-ТМV-53 были сопоставлены с другими ШГК хронологиями подзон южной тайги и подтайги Западно-Сибирской равнины из банка данных ИМКЭС СО РАН с помощью корреляционного анализа для оценки степени влияния региональных и локальных, а также индивидуальных биологических факторов на рост и развитие деревьев на выбранных участках леса.

Для того чтобы проявить в углеродных древесно-кольцевых хронологиях сигнал, связанный с влиянием Томского водозабора, необходимо удалить из них другие сигналы, как минимум связанные с влиянием глобальных факторов. Такими факторами являются глобальные изменения изотопного состава углерода ( $\delta^{13}C_{CO_2}$ ) и концентрации  $CO_2$  в атмосфере. Для этих целей выполнена pin-коррекция δ<sup>13</sup>C<sub>or</sub>-TMV-53 и δ<sup>13</sup>C<sub>or</sub>-TMCH-51 хронологий методом, предложенным [McCarrol et al., 2009]. Для выполнения корректирующих процедур использованы значения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере [Robertson et al., 2001; McCarrol and Loader, 2004; The state of greenhouse gases..., 2006-2017]. В результате коррекции хронологии  $\delta^{13}C_{or}$ -TMV-53 и  $\delta^{13}$ C<sub>or</sub>-TMCH-51 были преобразованы в  $\delta^{13}$ C<sub>pin</sub>-ТМV-53 и δ<sup>13</sup>C<sub>pin</sub>-ТМСН-51.

Полученные нами древесно-кольцевые ряды исследовались классическими методами анализа временных рядов. Изучена структура используемых временных рядов. Каждый



*Puc.* 1. Древесно-кольцевые ряды значений  $\delta^{13}C_{or}$ -TMCH-51 (сплошная линия) и  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMCH-51 (штриховая линия) (*a*). Ряды значений  $\delta^{13}C_{or}$ -TMV-53 (сплошная линия) и  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMV-53 (штриховая линия) (б)

временной ряд значений  $\delta^{13}C_{or}$  и  $\delta^{13}C_{pin}$  разделен на две составляющие: тренд и отклонения от него. Тренды представляют медленные многолетние изменения, отклонения от тренда характеризуют погодичные вариации исследуемого параметра. Расчет трендов выполнен с помощью метода кусочно-линейной регрессии (LOESS regression) с коэффициентом жесткости 0,6. Погодичные вариации – результат вычитания тренда из исследуемого ряда.

Влияние региональных и локальных факторов на изотопный состав целлюлозы древесины можно выявить с помощью сравнительного анализа скоростей изменения трендов хронологий  $\delta^{13}C_{or}$  и  $\delta^{13}C_{pin}$  между собой и со скоростями изменений теоретических трендов  $\delta^{13}C$  значений целлюлозы, отражающих глобальное уменьшение значений  $\delta^{13}C_{CO2}$ . Теоретические тренды можно рассчитать с помощью уравнений изотопного фракционирования углерода растениями на уровне листа [Farquar et al., 1989]:

$$\Delta = a + (b - a)c_i/c_a, \tag{2}$$

$$\delta^{13}C_{\text{plant}} = \delta^{13}C_{\text{CO}_2} - \Delta, \qquad (3)$$

где  $\Delta$  – величина фракционирования изотопов углерода; а и b - константы фракционирования вследствие диффузии СО2 через устьица (≈4,4 ‰) и карбоксилирования в процессе фотосинтеза ( $\approx 27-28 \%_0$ );  $c_i$  и  $c_a$  – концентрация СО2 в межклеточном пространстве и в окружающей воздушной среде соответственно;  $\delta^{13}C_{plant}$  – отношение стабильных изотопов углерода продуктов фотосинтеза (в нашем случае в целлюлозе),  $\delta^{13}C_{CO_2}$  – отношение стабильных изотопов углерода в атмосферном СО2 [Francey et al., 1999; McCarrol, Loader, 2004]. Для сравнения удобнее всего использовать теоретические тренды, отражающие минимальный и максимальный отклики изотопного состава углерода целлюлозы на глобальные изменения  $\delta^{13}C_{CO_2}$  и концентрации  $CO_2$ в атмосфере. Расчет теоретических трендов выполнен согласно подходу, описанному [McCarrol et al., 2009]. При минимальном отклике изменения  $\delta^{13}C_{plant}$  в ответ на изменения  $\delta^{13}C_{CO_2}$  отсутствуют, для вычисления тренда необходимо принять ограничение  $c_i/c_a =$ = const, при этом график тренда представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс (рис. 2, в, линия 1). При максимальном отклике график  $\delta^{13}C_{plant}$  изменяется пропорционально изменениям  $\delta^{13}C_{CO_2}$ , для вычисления тренда, характеризующего "максимальный" отклик, необходимо ввести ограничение  $c_i - c_a = \text{const.}$  В этом случае тренд  $\delta^{13}C_{plant}$  близок по форме к тренду, описывающему изменения  $\delta^{13}C_{CO_2}$  в атмосфере (рис. 2, *в*, линия 2). В качестве констант для расчетов принимают значения выражений  $c_i/c_a$  и c<sub>i</sub> – c<sub>a</sub> доиндустриального периода [McCarrol et al., 2009]. Изотопные хронологии ТМСН-51 и TMV-53 охватывают временные интервалы 1864-2010 и 1867-2016 гг. соответственно, поэтому для расчета констант использованы значения  $c_i/c_a$  и  $c_i - c_a$  в 1867 г. Зная значения  $c_a$  и соответствующей константы, рассчитывали значения с<sub>i</sub>. Затем согласно формулам (2) и (3) вычисляли теоретические значения  $\delta^{13}C_{plant}$ , временные ряды которых отражают минимальный и максимальный отклик на глобальное изменение  $\delta^{13}C_{CO_2}$  (см. рис. 2, в). Графики изменений теоретически рассчитанных значений не отражают наличие или отсутствие в δ<sup>13</sup>C<sub>or</sub>-хронологиях сигналов, связанных с физиологической реакцией деревьев на увеличение концентрации СО<sub>2</sub>, которые также носят глобальный характер [Keeling et al., 2017]. Однако сопоставление  $\delta^{13}C_{or}$ -хронологий с теоретически рассчитанными позволяет оценить согласованность первых с глобальными тенденциями, а сопоставление  $\delta^{13}C_{pin}$ -хронологий с теоретическими рассчитанными показывает, как обнаружить и сделать более четким влияние других факторов на формирование изотопного состава углерода в целлюлозе годичных колец. Если на изотопный состав целлюлозы деревьев не влияют локальные или региональные особенности формирования изотопного состава углерода атмосферного СО<sub>2</sub>, а также многолетние изменения климатических параметров, то скорости изменения значений трендов  $\delta^{13}C_{or}$ -хронологий имеют одинаковые знаки и их абсолютные значения находятся в диапазоне от нуля до значения скорости изменения тренда "максимальной" реакции, а тренды δ<sup>13</sup>C<sub>pin</sub>-хронологий по форме близки к тренду "минимальной" реакции.

Для оценки степени влияния климатических факторов на изменчивость  $\delta^{13}C_{pin}$ -хронологий был выполнен расчет коэффициентов корреляции их погодичных вариаций с таковыми вариациями среднемесячных значений температуры и относительной влажности



Рис. 2. Тренды хронологий (a, б – соответственно ТМСН-51 и ТМV-53:  $\delta^{13}C_{or}$  – сплошные линии,  $\delta^{13}C_{pin}$  – штриховые линии); в – теоретически рассчитанные тренды для  $\delta^{13}C_{or}$  хронологий: 1 – отсутствие реакции на изменение  $\delta^{13}C_{CO_2}$  в атмосфере; 2 –  $\delta^{13}C_{or}$  пропорционально изменяется вместе с  $\delta^{13}C_{CO_2}$ ; г – погодичные изменения  $\delta^{13}C_{pin}$ -ТМСН-51 (штриховая линия) и  $\delta^{13}C_{pin}$ -ТМV-53 (сплошная линия) хронологий

воздуха, месячными суммами осадков за июнь, июль и август, а также со средними значениями температуры и относительной влажности и суммами осадков за весь летний период – июнь-август. Для расчетов использовались данные [Булыгина и др., 2014, 2015; Кузнецова и др., 2019]. Статистическая значимость коэффициентов определялась с доверительной вероятностью 95 %. Также выполнен графический анализ трендов δ<sup>13</sup>С<sub>ріп</sub>-хронологий и перечисленных метеопараметров.

Все вычисления выполнены в программном пакете Mathcad 15.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Обобщенные локальные ШГК-хронологии лиственницы сибирской на участке TMCH-51 и сосны обыкновенной на участке TMV-53 статистически значимо коррелируют между собой, коэффициент корреляции составляет r == 0,31, несмотря на видовые различия и рубки деревьев на первом участке. Обобщенные локальные ШГК-хронологии сосны обыкновенной на этих участках леса также значимо коррелируют между собой с коэффициентом r = 0,41.

Результаты измерения отношений стабильных изотопов углерода в целлюлозе сосны и лиственницы представлены в виде графиков  $\delta^{13}C_{or}$  (см. рис. 1).

Средние значения  $\delta^{13}C_{or}$  целлюлозы годичных колец лиственницы (ТМСН-51) и сосны (TMV-53) и их среднеквадратичные отклонения составляют соответственно  $-24,89 \pm 1,03$ и -24,3 ± 1,07 ‰. Как видно из приведенных статистических характеристик, изменения  $\delta^{13}C_{or}$  целлюлозы обоих видов деревьев на исследуемых участках леса происходят в одном и том же диапазоне значений, однако тенденции этих изменений существенно отличаются. Многолетние изменения  $\delta^{13}C_{or}$ -хронологий, характеризующиеся трендами (рис. 2, а, б), до конца 1960-х годов имеют противоположные направленности, после - одинаковые. Между погодичными изменениями δ<sup>13</sup>C<sub>or</sub>-хронологий (рис. 2, г) корреляция статистически незначима.

В изменениях  $\delta^{13}C_{or}$ -TMCH-51 (см. рис. 1, б) отчетливо прослеживается влияние лесозаготовительной в 1955/56 г. и, вероятнее всего, выборочной 1985/86 г. рубок. Их последствия проявляются в виде резких снижений значений в конце 1950-х – начале 1960-х годов и в конце 1980-х – начале 1960-х годов. Наиболее сильное влияние оказала рубка 1955/56 г., после нее произошло резкое увеличение  $\delta^{13}$ С-значений в целлюлозе лиственницы. В связи с этим тренд ряда  $\delta^{13}C_{or}$ -TMCH-51 (см. рис. 2, *a*, б) имеет разрыв, т. е. состоит из двух частей, которые соответствуют периодам 1884–1963 и 1964–2010 гг.

На рис. 2, в приведены тренды, отражающие вероятные изменения  $\delta^{13}$ C значений целлюлозы годичных колец деревьев под влиянием глобальных изменений  $\delta^{13}C_{CO_2}$ , рассчитанные с помощью уравнений (2) и (3). Кривая 2 (см. рис. 2, в), соответствующая "максимальному" отклику на глобальные изменения δ<sup>13</sup>C<sub>CO2</sub>, является постоянно убывающей со скоростью  $\approx -0.08 \ \% o/10$  лет в период с 1864 г. до середины 1960-х годов и  $\approx -0.28 \ \%_0/10$ лет с середины 1960-х до 2016 г. Тренд  $\delta^{13}C_{or}$ -ТМСН-51 (см. рис. 2, *a*) так же, как и кривая 2 на рис. 2, в, убывает на всем исследуемом временном интервале. Однако скорость снижения значений  $\delta^{13}C_{or}$ -TMCH-51 отличается более чем в 2 раза, в первый период 1864-1964 гг. она составляет -0,29 % / 10 лет, во второй период 1964-2010 гг.--0,7 ‰/10 лет. Поведение тренда δ<sup>13</sup>С₀г-TMV-53 существенно отличается от поведения кривой 2 в период 1967-1968 гг., δ<sup>13</sup>C<sub>or</sub> возрастает со скоростью приблизительно +0,27 ‰/10 лет. Только после 1968 г. тренд  $\delta^{13}C_{or}$ -TMV-53 начинает убывать со средней скоростью -0,7 % /10 лет. Примечательно, что скорость изменений обеих  $\delta^{13}C_{or}$ -хронологий с середины – конца 1960-х годов одинаковая.

В  $\delta^{13}C_{pin}$ -хронологиях  $\delta^{13}C_{or}$ -хронологии после коррекции данных в целом сохраняются обнаруженные тенденции, однако скорость изменения трендов значительно ниже (см. рис. 2, *a*, *б*). Тренд  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMCH-51 до середины 1960-х годов убывает со скоростью -0,16 ‰/10 лет, после – со скоростью -0,2 ‰/10 лет. Тренд  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMV-53 в период 1867-1978 гг. возрастает со скоростью +0,3 ‰, в период 1978-2016 гг. убывает со скоростью -0,2 ‰/10 лет. После 1978 г. изменения обеих  $\delta^{13}C_{pin}$ -хронологий происходят с одной и той же скоростью.

Графический анализ трендов показал, что многолетние изменения  $\delta^{13}C_{\text{pin}}$  значений целлюлозы не могут быть полностью объяснены многолетними изменениями климатических параметров. Что касается погодичных вариаций (см. рис. 2, г), то обнаружена слабая, но статистически значимая корреляция с доверительной вероятностью 95 %  $\delta^{13}C_{nin}$ -ТМСН-53 со средней температурой и суммой осадков за три летних месяца (сезон активного роста), коэффициенты корреляции составляют r = 0.35 и r = -0.33 соответственно, с суммой осадков июня (r = -0,33). Также обнаружена статистически значимая, но еще более слабая корреляция погодичных вариаций  $\delta^{13}C_{\text{pin}}$ -TMV-51 со средней температурой и суммой осадков за три летних месяца (соответственно r = 0.25 и r = -0.32), со среднемесячной температурой июля (r = 0,21) и августа (r = 0,22), среднемесячной относительной влажностью июля (r = -0,34). Анализ изменений значений скользящих коэффициентов корреляции с шириной окна 40 лет показал, что корреляционные связи погодичных вариаций  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMCH-53 и  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMV-51 и климатических параметров непостоянны во времени. Более стабильные по времени и сильные корреляционные связи с метеопараметрами оказались у  $\delta^{13}C_{\text{pin}}$ -TMCH-53.

## обсуждение

На территории Обь-Томского междуречья гидротермические условия в целом оптимальны для роста и развития хвойных видов деревьев. Ширина годичных колец в таких условиях во многом определяется индивидуальными особенностями деревьев и конкурентными взаимоотношениями между ними в древостое. Согласно нашим данным [Маркелова и др., 2012], в среднем только 31-53 % дисперсии значений ширины годичных колец деревьев в условиях суходольных местообитаний можно объяснить влиянием общих, чаще всего климатических, факторов на радиальный рост деревьев в пределах исследуемой территории. Эта величина зависит от возраста и структуры древостоя. Максимальные значения наблюдаются у одновозрастных 140-150-летних сосновых древостоев,

к этой группе относится древостой на участке TMV-53. Минимальные значения - у разновозрастных сосновых и смешанных древостоев, к этой группе относится участок леса ТМСН-51. Поскольку изменения метеорологических параметров - температуры и относительной влажности воздуха, количества осадков – в целом в течение всего периода инструментальных наблюдений на метеостанции Томск происходило в диапазоне, комфортном для роста древесной растительности, коэффициенты корреляции между стандартными индексами прироста деревьев в радиусе 70 км от г. Томска относительно невысокие. Для одновозрастных сосновых древостоев они в среднем находятся в диапазоне от  $0.42 \pm 0.21$ до  $0.61 \pm 0.14$ ; для разновозрастных сосновых и смешанных древостоев – от  $0.29 \pm 0.21$ до 0,55±0,18. Полученные нами коэффициенты корреляции индексов прироста лиственницы и сосны (ТМСН-51) с индексами прироста сосны (TMV-53) соответствуют описанной ситуации. Следовательно, рост деревьев на сравниваемых участках частично определяется одними и теми же факторами в той степени, которая характерна для подзон южной тайги и подтайги Западно-Сибирской равнины. Это позволяет сравнивать полученные нами древесно-кольцевые хронологии отдельно ширины и отдельно  $\delta^{13}$ С целлюлозы между собой и снижает вероятность неверной интерпретации информации, полученной при анализе изотопных хронологий.

Полученные нами изотопные древесно-кольцевые хронологии, в отличие от ШГК-хронологий, демонстрируют больше отличий, чем схожих черт, в изменчивости в течение большей части исследуемого периода. На это указывают противоположные тенденции их многолетних изменений и отсутствие корреляции между погодичными вариациями.

Величина колебаний вокруг средних значений  $\delta^{13}$ С составляет 1,03–1,07 ‰ и не выходит за пределы естественной изменчивости, т. е. можно исключить влияние на формирование изотопного состава углерода целлюлозы древесины загрязняющих атмосферу веществ в концентрации, нарушающей функционирование ассимиляционного аппарата растений. Для сравнения, изменения значений  $\delta^{13}$ С в целлюлозе годичных колец, вызванные содержанием в атмосфере загрязняющих ве-

ществ, могут достигать 4 ‰ и более [Savard et al., 2004].

Тенденции многолетних изменений, обнаруженные в  $\delta^{13}C_{or}$ -хронологиях, в целом сохраняются и в  $\delta^{13}C_{pin}$ -хронологиях, которые не содержат в себе глобальных сигналов, связанных с уменьшением значений  $\delta^{13}C_{CO_2}$  и увеличением концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере. Поскольку, как показали наши результаты, эти тенденции нельзя объяснить многолетней динамикой климатических параметров, то, вероятнее всего, они являются результатом региональных и локальных факторов, определяющих изотопный состав углерода CO<sub>2</sub>, потребляемого деревьями.

Тренд  $\delta^{13}C_{\text{pin}}$ -ТМСН-53 по характеру изменений в целом повторяет глобальные тенденции в изменениях  $\delta^{13}C_{CO_2}$ . Скорости изменений сопоставимы с глобальными. С 1978 г. многолетние изменения  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMCH-53 и  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMV-51 хронологий становятся идентичными. Мы полагаем, что изменения тренда  $\delta^{13}C_{\text{pin}}$ -ТМСН-53 и части тренда  $\delta^{13}C_{\text{pin}}\text{-}\text{TMV-51},\,\,\text{со-}$ ответствующей периоду 1978-2016 гг., можно объяснить региональными особенностями формирования изотопного состава целлюлозы древесины в сомкнутых древостоях подтайги на территории Обь-Томского междуречья. Вероятно, значение δ<sup>13</sup>С потребляемого деревьями СО2 ниже среднеглобального значения за счет большей концентрации в воздухе под пологом леса более легкого по изотопного составу углерода СО<sub>2</sub>, образовавшегося при разложении органических веществ и дыхании организмов.

Тренд хронологи<br/>и $\delta^{13}C_{\text{pin}}\text{-}TMV\text{-}53$ до 1978 г. является возрастающим. Многолетними тенденциями климатических параметров и особенностями развития внутри древостоя TMV-53, в отличие от TMCH-51, утяжеление изотопного состава углерода целлюлозы сосны объяснить нельзя. Погодичная изменчивость  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMV-53 также слабее коррелирует с вариациями климатических параметров, чем δ<sup>13</sup>C<sub>pin</sub>-TMCH-53. Исходя из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что на изменчивость  $\delta^{13}C_{\text{pin}}$  в целлюлозе деревьев на участке TMV-53 явно значительное влияние оказывает локальный фактор, т.е. источник поступления более тяжелого по изотопному составу углерода СО2. Наиболее вероятной причиной выявленных многолетних

изменений  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMV-53 являются процессы на Тимирязевском болоте, которые влияют на изотопный состав углерода CO<sub>2</sub>, потребляемого деревьями.

Тимирязевское болото по составу растительности и режиму питания относится к переходному типу. Начиная со второй половины XX в. данное болото подвергается постоянному воздействию антропогенных факторов, в результате которого происходят изменения его гидрогеохимического режима. Когда-то это болото было частью Чагинского болотного массива. В результате осушительных мероприятий, которые массово проводились на территории Обь-Томского междуречья в 1960-1970-х годах [Шмаков, 2016], произошло его обособление. Дальнейшее и более мощное, постоянно действующее влияние на гидрогеохимические процессы Тимирязевского болота оказывает работа Томского подземного водозабора. Скважины первой очереди, одна из них расположена в 40 м от участка TMV-53 и в 50 м от болота, были введены в эксплуатацию в 1972 г. Откачка подземных вод палеогенового комплекса привела к резкому понижению уровня подземных вод четвертичного комплекса, а также уровней грунтовых и болотных вод в первое десятилетие 1970-80 гг. эксплуатации скважин [Состояние..., 2018]. Далее влияние водозабора на уровень грунтово-болотных вод проявлялось главным образом в увеличении его сезонной амплитуды [Шмаков, 2016]. Согласно данным [Шмаков, 2016], амплитуда сезонных колебаний уровней болотных вод Тимирязевского болота составляет 0,3-1,5 м, что почти в 2 раза выше, чем у аналогичных природных объектов [Иванов, 1975; Земцов, 2000].

Известно, что средний уровень болотных вод и амплитуда его колебаний определяют мощность зоны аэрации, т. е. границу доступа кислорода. У переходных болот в Западной Сибири она обычно находится на глубине 0,2–1,0 м [Иванов, 1975; Земцов, 2000], у Тимирязевского болота по данным за 2010– 2015 гг. – 2,0 м [Шмаков, 2016]. Образование СО<sub>2</sub> в болотных экосистемах в зоне аэрации и за ее пределами, в инертном горизонте, происходит разными способами. От того, по какому пути шло образование СО<sub>2</sub>, зависит изотопный состав его углерода.

В инертном горизонте разложение органического вешества происходит без доступа кислорода с образованием метана и диоксида углерода. По некоторым данным [Corbett et al., 2012] эти два вещества образуются приблизительно в эквимолярном количестве. При этом разделение изотопов углерода межу метаном и диоксидом углерода происходит таким образом, что первый газ сильно обеднен тяжелыми изотопами, а второй, наоборот, обогащен ими. Значение  $\delta^{13}C_{CO_2}$ , образовавшегося в инертной зоне, находится в диапазоне от -8 до -17 ‰ [Whiticar et al., 1986; Ривкина и др., 2006]. В зоне аэрации при разложении органического материала образуется СО2 со значением  $\delta^{13}C_{CO_2}$ , близким к  $\delta^{13}C$  исходного органического материала, т. е.  $\delta^{13}C_{CO_2}$  находится в диапазоне от -23 до -31 ‰. Таким образом, поведение тренда  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMV-51 хронологии отражает изменения в гидрологическом и биогеохимическом режимах Тимирязевского болота. До 1978 г. в эмиссии болотного  $CO_2$  в атмосферу была выше доля  $CO_2$ , образовавшегося в бескислородной среде, по сравнению с более поздним периодом. После этой даты в результате увеличения мощности зоны аэрации, вызванного деятельностью подземного водозабора, роль этой части СО<sub>2</sub> в общей эмиссии упала.

### выводы

Таким образом, многолетние изменения значений  $\delta^{13}$ C в целлюлозе годичных колец деревьев в подтайге на территории Обь-Томского междуречья происходят со скоростью, выше глобальной на 0,16-0,2 % /10 лет. Многолетние изменения  $\delta^{13}C_{pin}$ -TMV-53 отражают перераспределение вкладов в общий поток эмиссии СО<sub>2</sub> от разных процессов, протекающих в Тимирязевском болоте. После падения уровня грунтово-болотных вод и увеличения мощности зоны аэрации Тимирязевского болота многолетние изменения изотопного состава углерода в целлюлозе годичных колец деревьев на участке TMV-53 стали синхронными с аналогичными изменениями на участке TMV-51, в непосредственной близости от которого нет болотных и заболоченных биогеоценозов.

Работа выполнена в рамках финансирования госбюджетной темы.

- Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Коршунова Н. Н., Швец Н. В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. 2015. http://meteo.ru/data/158-total-precipitation (дата обращения 03.09.2020).
- Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. 2014. http://meteo. ru/data/156-temperature#описание-массива-данных (дата обращения 03.09.2020).
- Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
- Дюкарев А. Г., Пологова Н. Н. Водный режим почв в зоне влияния Томского водозабора // Вестн. ТГУ. 2009. № 324. С. 363–371.
- Дюкарев А. Г., Пологова Н. Н. Почвы Обь-Томского междуречья // Вестник ТГУ. Биология. 2011а. Т. 15, № 3. С. 16–37.
- Дюкарев А. Г., Пологова Н. Н. Состояние природной среды в зоне действия Томского водозабора // Сиб. экол. журн. 2011а. № 1. С. 123–135. [Dyukarev A. G., Pologova N. N. State of natural environment in the Tomsk water intake area // Contemporary Problems of Ecology. Vol. 4, N 1. 2011. P. 91–99].
- Земцов А. А. Болота Западной Сибири их роль в биосфере. Томск: ТГУ, СибНИИТ, 2000. 72 с.
- Иванов К. Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 280 с.
- Кузнецова В. Н., Давлетшин С. Г., Швец Н. В. Описание базы данных среднемесячная относительная влажность воздуха на метеорологических станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621537. 2019. http://meteo.ru/ data/790-srednemesyachnaya-otnositelnaya-vlazhnost -vozdukha#описание-массива-данных (дата обращения 04.09.2020).
- Маркелова А. Н., Николаева С. А., Тартаковский В. А. Совместная фильтрация древесно-кольцевых хронологий *Pinus sylvestris* L., произрастающей в оптимальных условиях // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Биология. 2012. Т. 5, № 1. С. 13-26.
- Маркелова А. Н., Симонова Г. В., Калашникова Д. А., Волков Ю. В., Мелков В. Н. Изотопная дендрохроноиндикация антропогенных процессов в южно-таежной подзоне Западно-Сибирской равнины // Тринадцатое Сиб. совещ. и шк. молодых ученых по климатоэкологическому мониторингу: тез. докл. рос. конф. / под ред. М. В. Кабанова. Томск: Аграф-Пресс, 2019. С. 207–208.
- Николаева С. А., Савчук Д. А. Комплексный подход и методика реконструкции роста и развития деревьев и лесных сообществ // Вестн. ТГУ. Биология. 2009. Т. 6, № 2. С. 111–125.
- Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учеб. пособие для вузов. М.: Экология, 1991. 320 с.
- Попов В. К., Коробкин В. А., Рогов Г. М., Лукашевич Л. Д., Галямов Ю. Ю., Юргин Б. И., Золотарев В. В. Формирование и эксплуатация подземных

вод Обь-Томского междуречья. Томск: ТГАСУ, 2002. 143 с.

- Ривкина Е. М., Краев Г. Н., Кривушин К. С., Лауринавичус К. С., Федоров-Давыдов Д. Г., Холодов А. Л., Щербакова В. А., Галичинский Д. А. Метан в вечномерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. Т. Х. № 3. С. 23-41.
- Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2017 г. Информационный бюллетень / под ред. В. А. Льготина. Томск: ООО "Д-Принт", 2018. 178 с.
- Хромых В. В. Природа и ландшафты юга Обь-Томского междуречья // Вопр. географии Сибири. 1997. Вып. 22. С. 198–211.
- Шмаков А. В. Гидрогеохимический режим заболоченных территорий в подтаежной зоне Западной Сибири (на примере Тимирязевского болота у г. Томска): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2016. 21 с.
- Borella S., Leuenberger M. Reducing uncertainties in  $\delta^{13}$ C analysis of tree rings: Pooling, milling, and cellulose extraction // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103, N 16. P. 19.519–19.526.
- Cook E. R., Berifa K. R., Shiyatov S. G., Mazepa V. S. Treering standartization and growthtrend estimation // Methods of dendrochronology. Application in the Environmental Sciences / Eds. E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1990. P. 104-123.
- Corbett J. E., Tfaily M. M., Burdige D. J., Cooper W. T., Glaser P. H., Chanton J. P. Partitioning pathways of CO<sub>2</sub> production in peatlands with stable carbon isotopes // Biogeochemistry. 2012. Vol. 114. P. 327-340.
- Farquhar G. D., Ehleringer J. R., Hubick K. T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis // Annu. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol. 1989. Vol. 40. P. 503-537.
- Francey R. J., Allison C. E., Etheridge D. M., Trudinger C. M., Enting I. G., Leuenberger M., Langenfelds R. L., Michel E., Steele L. P. A 1000-year high precision record of δ<sup>13</sup>C in atmospheric CO<sub>2</sub> // Tellus. 1999. Vol. 51B. P. 170–193.
- Holmes R. L. Program COFECHA: Version 3. Tuscon: Laboratory of tree-ring research. University of Arizona. 1992.
- Keeling R. F., Graven H. D., Welp L. R., Resplandy L., Bi J., Piper S. C., Sun Y., Bollenbacher A., Meijer H. A. J. Atmospheric evidence for a global secular increase in carbon isotopic discrimination of land photosynthesis // PNAS. 2017. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/ pnas.1619240114
- McCarrol D., Loader N. J. Stable isotopes in tree rings // Quat. Sci. Rev. 2004. Vol. 23. P. 771-801.
- McCarrol D., Gagen M. H., Loader N. J., Robertson I., Anchukaitis K. J., Los S., Young G. H. F., Jalkanen R., Kirchhefer A., Waterhouse J. S. Correction of tree ring stable carbon isotope chronologies for changes in the carbon dioxide content of the atmosphere // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. Vol. 73. P. 1539–1547.
- Rinn A. TSAP. Reference Manual. Ver 3.0. Heidelberg, 1996. 264 p.
- Robertson A., Overpeck J., Rind D., Mosley-Thompson E., Zielinski G., Lean J., Koch D., Penner J., Tegen I., Healy R. Hypothesized climate forcing time series for the last 500 years // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 14783-14803.
- Savard M. M., Begon C., Parent M., Smirnoff A., Marion J. Effects of smelter sulfer dioxide emissions: A spa-

tiotemporal perspective using carbon isotopes in tree rings // J. Environ. Quol. 2004. Vol. 33. P. 13–26.

- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2005. WMO Greenhouse Gas Bull. (GHG Bulletin). 2006. N 2. https://library. wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=7252
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2006. WMO Greenhouse Gas Bull. (GHG Bulletin). 2007. N 3. https://library. wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=7256
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2007. WMO Greenhouse Gas Bull. (GHG Bulletin). 2008. N 4. https://library. wmo.int/doc num.php?explnum id=7259
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2008. WMO Greenhouse Gas Bull. (GHG Bulletin). 2009. N 5. https://library. wmo.int/doc num.php?explnum id=7264
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2009. WMO Greenhouse Gas Bull. (GHG Bulletin). 2010. N 6. https://library. wmo.int/doc num.php?explnum id=7270
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2010. WMO Greenhouse Gas Bull. (GHG Bulletin). 2011. N 7. https://library. wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=7276
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2011. WMO Greenhouse Gas Bull. (GHG Bulletin). 2012. N 8. https://library. wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=7282

- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2012. // WMO Greenhouse gas bulletin (GHG Bulletin). 2013. N 9. https://library.wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=7288
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2013. WMO Greenhouse gas bulletin (GHG Bulletin). 2014. N 10. https://library. wmo.int/doc num.php?explnum id=7236
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2014. WMO Greenhouse gas bulletin (GHG Bulletin). 2015. N 11. https://library. wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=7243
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2015. WMO Greenhouse gas bulletin (GHG Bulletin). 2016. N 12. https://library. wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=3084
- The state of greenhouse gases in the athmosphere based on global observations through 2016. WMO Greenhouse gas bulletin (GHG Bulletin). 2017. N 13. https://library. wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=4022
- Witicar M. J., Faber E., Schoel M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO<sub>2</sub> reductio vs. acetate fermentation – isotope evidence // Geochim. Cosmochim. Acta. 1986. Vol. 50. P. 693-709.
- Zhu X., Di D., Ma M., Shi W. Stable isotopes in greenhouses gases from soil: A review of theory and application // Atmosphere. 2019. Vol. 10, N 7. P. 377 https://doi.org/10.3390/atmos10070377

# Long-term variations of $\delta^{13}$ C in tree ring cellulose of the Ob-Tom interfluve

A. N. MARKELOVA, G. V. SIMONOVA, D. A. KALASHNIKOVA, Yu. V. VOLKOV

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAN 634055, Tomsk, Academichesky av., 10/3 *E-mail:* annanikmark@rambler.ru

Long-term variations of stable carbon isotope rations in tree ring cellulose for two forest sites of the Ob-Tom interfluve territory are analyzed. At the first site, the expected decrease in  $\delta^{13}$ C values was found, but its rate was higher than the global one by  $0.16-0.2 \, \%_0/10$  years. At the second site, located 20 m from the peatland, the  $\delta^{13}$ C value was increased until 1978 and then decreased at the same rate as in the first site –  $0.2 \, \%_0/10$  years. We assume that the  $\delta^{13}$ C values variations in tree ring cellulose at the second site reflect changes in  $\delta^{13}$ C value of CO<sub>2</sub> emitted from the peatland. The reason for the changes in dynamics after 1978 is probably the influence of the Tomsk underground water intake, which led to the drying up of the peatland and, accordingly, a decrease in the  $\delta^{13}$ C value in CO<sub>2</sub>.

Key words: Larix sibirica, Pinus sylvestris,  $\delta^{13}$ C, carbon isotopes, indication of biogeochemical processes, West Siberia.