

УДК 581.132.8:582.091:551.515

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ ОТНОШЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА В ПЫЛЬЦЕ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ СЕЗОНА ВЕГЕТАЦИИ

Бляхарчук Татьяна Артемьевна,

докт. биол. наук, ведущий научный сотрудник
Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Россия, 643055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.
E-mail: tarun5@rambler.ru.

Симонова Галина Владимировна,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института мониторинга
климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 643055, г. Томск,
пр. Академический, 10/3; доцент кафедры оптико-электронных систем и
дистанционного зондирования Национального исследовательского
Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск,
пр. Ленина, 36. E-mail: galina_simonova@inbox.ru

Ветрова Ольга Викторовна,

научный сотрудник Института мониторинга климатических и экологических
систем СО РАН, Россия, 643055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.
E-mail: vetrovao.v@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска более точных маркеров индикации палеоклимата Сибири для верификации стратиграфии отложений при разведке георесурсов.

Цель работы. Выявить перспективы использования изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ пыльцы лиственных древесных видов флоры Сибири для палеоклиматических исследований.

Методы исследования. С этой целью был исследован изотопный состав пыльцы восьми видов сибирской флоры, собранной в разные годы, и результаты сопоставлены с погодными условиями апреля и мая года сбора пыльцы. Для исследования сухая очищенная пыльца выбранных видов растений сжигалась в окислительно-восстановительном реакторе элементного анализатора Flash 2000. Выделившийся при горении CO_2 анализировался в изотопном масс-спектрометре DELTA V Advantage (Том ЦКП СО РАН). Методические для апреля и мая года сбора пыльцы были взяты с интернет-сайта.

Результаты. Анализ изотопного состава пыльцы лиственных деревьев сибирской флоры показал перспективность использования этого метода для индикации доминирующих погодных условий периода формирования пыльцы, то есть для палеоклиматических исследований. Исследование показало прямую зависимость обилия стабильного изотопа ^{13}C в пыльце лиственных деревьев от температуры (чем выше температура, тем больше ассимилируется изотопа ^{13}C в пыльце) и обратную зависимость от обилия осадков (чем больше осадков, тем меньше ассимилируется изотопа ^{13}C в пыльце). Ослабленные растения и растения, произрастающие при меньшей солнечной освещенности, ассимилировали заметно меньшее количество изотопа ^{13}C по сравнению со здоровыми растениями, произрастающими в более благоприятных условиях.

Ключевые слова:

Пыльца, древесные виды, стабильный изотоп углерода ^{13}C , фракционирование стабильных изотопов, температура, осадки, палеоклимат.

Введение и литературный обзор

В последние годы анализ изотопного состава углерода в растительных тканях и органах находит разнообразное практическое и фундаментальное применение в биологии, экологии и геологии. Сфера использования этого метода в биологии и экологии простирается от изучения физиологических процессов в организмах до изучения современных экологических условий [1], а также палеоэкологических и палеоклиматических реконструкций [2]. Исследования показали, что различные организмы по-разному накапливают в своём теле стабильный изотоп углерода ^{13}C . Так, цветковые растения, имеющие C_4 -механизм фотосинтеза (виды семейства *Chenopodiaceae* и некоторые куль-

турные злаки американского происхождения) характеризуются значениями $\delta^{13}\text{C}$ (в ‰ PDB) в пределах от -6 до $-23,5$, а растения, имеющие C_3 -механизм фотосинтеза (большинство современных сосудистых растений) имеют значения $\delta^{13}\text{C}$ значительно ниже – от -23 до -34 . Это объясняется более эффективным усваиванием углекислоты растениями C_4 -типа за счет сокращения потерь промежуточных продуктов фотосинтеза при фотодыхании [3]. У эукариотных водорослей диапазон варьирования значений $\delta^{13}\text{C}$ значительно шире, от -8 до $-24,5$ ‰, и наиболее широкий разброс значений содержания изотопа ^{13}C отмечен в метаногенных бактериях, где величина $\delta^{13}\text{C}$ изменяется от $+6$ до -41 ‰ [4].

Отношения стабильных изотопов углерода $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ использовались при исследовании физиологических процессов в растениях, произрастающих в различных экологических условиях, для выявления водного стресса [5]. Сосудистые растения реагируют на вариации в доступности воды и влажности воздуха путём открытия и закрытия листовых устьиц. Это ведёт к изменению в соотношении стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) атмосферного CO_2 , используемого растением в фотосинтезе [6, 7]. В экспериментальных исследованиях на микроорганизмах установлено, что в условиях некоторого дефицита по субстрату температурные колебания начинают влиять на величину изотопных характеристик микробной биомассы [8].

Эколого-географические исследования показали, что растения с механизмами фотосинтеза C4 и C3 по-разному представлены в различных флорах. Так, растения C4 более обильны в аридных регионах, а растения C3 – в более гумидных регионах [9]. На основании этой закономерности был разработан метод анализа устойчивых изотопов углерода ископаемого растительного материала для выявления климатических сдвигов растительных зон по флорам с различной представленностью видов C3 и C4 в прошлые эпохи земной истории [10], что необходимо при стратиграфических исследованиях в геологии.

Важным направлением является использование стабильных изотопов для решения проблем палеоклиматологии [11]. При этом возникает необходимость решать следующие вопросы: В какой степени различные виды живых организмов фракционируют устойчивые изотопы? Как влияют вариации условий окружающей среды на фракционирование устойчивых изотопов в живых организмах? Влияют ли вариации погодных условий на фракционирование устойчивых изотопов углерода растениями? Какие компоненты «природных архивов» палеоинформации в торфах и озёрных отложениях наиболее пригодны для получения изотопного сигнала об изменении окружающей среды? Исследования по этим вопросам в мире только недавно начались. Полученные результаты немногочисленны, а выводы порой противоречивы. Так, исследования содержания ^{13}C в *Sphagnum* биомаркере показали, что при насыщении сфагнума водой фотосинтезирующие клетки снижают потребление CO_2 и становятся менее чувствительными к поглощению ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$ увеличивается), и наоборот [12]. В другой же работе, напротив, показано, что количество осадков негативно коррелирует с содержанием ^{13}C в растениях. Чем больше осадков, тем меньше значения $\delta^{13}\text{C}$ в растительных тканях [13, 14]. Возможно, что данное противоречие объясняется морфолого-физиологическими особенностями именно сфагновых мхов, отличающими их от других групп растений. Но в любом случае оно указывает на необходимость дифференцированного подхода при изучении изотопного сигнала в растительных остатках. Примером такого

рода исследований является работа американского исследователя Хоуп Ярена [15], изучавшего соотношение стабильных изотопов в стеблях и пыльце 175 видов растений. Его исследования показали, что в зелёных стеблях растений содержится меньше изотопа ^{13}C , чем в пыльце того же вида, а в древесных стеблях – изотопа ^{13}C больше, чем в пыльце. Логически такая картина может быть объяснена тем, что в древесных стеблях (в отличие от пыльцы того же вида) аккумулируется углерод, ассимилированный за несколько лет, а в зелёных стеблях – только одного года вегетации, так как зелёные травянистые растения вегетируют в основном в течение одного сезона.

Современные способы выделения целлюлозы из торфов и её очищения позволили разработать метод изотопного анализа углерода и кислорода торфяных отложений для реконструкции динамики Азиатского муссона [16–18].

В ряде работ пыльца растений рассматривается как идеальная растительная ткань для палеоклиматических изотопных исследований [15], поскольку она сохраняется в осадках многие тысячи и миллионы лет и может быть отделена от другого ископаемого растительного материала. Кроме того, спорово-пыльцевые спектры, в отличие от растительных остатков и гуминовых составляющих, сохраняются в осадках стратиграфически, т. е. не перемешиваясь, и, следовательно, наиболее точно отражают условия окружающей среды во время их образования. Однако до настоящего времени изучению изотопного состава пыльцы посвящено лишь немного работ. Так, Амундсен с соавторами [19] изучил изотопный состав пыльцы 11 видов растений из семейства Роасеае. Десколас-Грос с соавторами [20] опубликовал значения $\delta^{13}\text{C}$ для пыльцы 33-х видов деревьев, трав и кустарников. Пионерные исследования зависимости изотопного состава пыльцы сосны от климата проведены Ллоаде-ром и Хеммингом [21].

Мы провели дополнительный анализ изотопных данных, опубликованных Хоуп Яреном [15], и нашли упущенную автором закономерность. Оказалось, что среди 175 видов растений, культивируемых в 11-ти ботанических садах США, парные экземпляры одного вида, выращиваемые в 2-х различных ботанических садах, имели разное содержание изотопа ^{13}C . При этом не выявилось какой-либо зависимости изотопного состава углерода в пыльце от географической широты, но в 7 из 8 имевшихся пар в пыльце древесного вида, культивированного в более континентальных условиях, содержание изотопа ^{13}C было выше, чем в растениях того же вида, культивированного в условиях мягкого морского климата. Таким образом, вероятно, в этих примерах проявилась отмеченная ранее закономерность уменьшения содержания изотопа ^{13}C в растительных тканях при увеличении количества осадков и наоборот [13, 14]. В качестве прямого наблюдения зависимости изотопного состава пыльцы от климатических параметров в

предлагаемом исследовании мы впервые провели измерение изотопного обогащения $\delta^{13}\text{C}$ пыльцы 8 видов лиственных пород сибирской флоры разных лет сбора и сравнили их с погодными условиями года сбора пыльцы.

Методы исследования

Как уже было отмечено выше, в предлагаемом исследовании было проведено измерение величины $\delta^{13}\text{C}$ в пыльце 8 видов сибирских лиственных пород деревьев, произрастающих в Томске и его окрестностях. Часть этих видов являются аборигенными для Сибири (*Betula pendula*, *Populus tremula*, *Salix caprea*, *Salix viminalis*). Остальные виды (*Ulmus laevis*, *Acer negundo*, *Tilia cordata*, *Populus nigra*) относятся к натурализовавшимся интродуcentам. В настоящее время эти виды широко используются в озеленении города и частично натурализовались в природе в окрестностях сибирских городов и посёлков.

В исследовании использовалась коллекция пыльцы, собиравшаяся в течение нескольких лет. Это позволило проследить изменение величины $\delta^{13}\text{C}$ в пыльце различных видов по годам и сопоставить эти данные с погодными условиями года цветения и сбора пыльцы. Нами были собраны метеоданные по среднемесячным температурам двух весенних месяцев – апреля и мая, в течение которых большинство сибирских древесных видов проходят физиологические фазы от начала весеннего сокодвижения до цветения и формирования листы. Метеоданные взяты с сайта: www.pogodaiklimat.ru.

Для изотопного исследования сухая пыльца растений тщательно очищалась от примесей (чешуек, пыльников и других растительных тканей) с помощью металлических сит с диаметром ячеек от 500 до 100 микрон. Затем 500 мкг очищенной пыльцы помещалось в оловянную капсулу и сжигалось в окислительно-восстановительном реакторе элементного анализатора Flash 2000 (ТомЦКП СО РАН). Выделившийся при горении CO_2 анализировался в изотопном масс-спектрометре DELTA V Advantage (ТомЦКП СО РАН). Изотопный состав измерялся относительно стандартного газа, прокальброванного по стандарту целлюлозы IAEA-CH-3 (МАГАТЭ), и выражался по формуле

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{обр}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{стан}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{стан}}} \cdot 1000.$$

Величина $\delta^{13}\text{C}$ представлена в тысячных долях (промилле), которые обозначаются значком «‰». Погрешность измерения не превышала $\pm 0,1$ ‰.

Результаты и обсуждения

Проведённый анализ показал, что наблюдается увеличение содержания тяжелого изотопа ^{13}C в органическом веществе пыльцевых зёрен древесных пород, принадлежащих к лиственным видам при более высоких среднемесячных температурах в пе-

риод цветения (таблица). Вероятно, более тёплые погодные условия стимулируют метаболические процессы в растениях этой группы, в результате чего, больше тяжелых изотопов ^{13}C поглощается растениями во время фотосинтеза органического вещества из углекислого газа и воды.

Интенсивность метаболических процессов, видимо, зависит также от общего физиологического состояния организма растения. В случае, когда физиологическое состояние растения ослаблено по каким-то причинам, как, например, в случае с поваленной берёзой (*Betula pendula*) на горелом болоте (образец № 19), наблюдается резкое снижение интенсивности поглощения углекислого газа с тяжелым изотопом углерода до значения $\delta^{13}\text{C} = -28,31$ ‰, по сравнению с растениями того же вида производящими пыльцу в не повреждённом состоянии в том же году ($\delta^{13}\text{C} = -26,72$ ‰ и $\delta^{13}\text{C} = -26,69$ ‰). Вероятно, что локальные экологические условия произрастания растения также влияют на интенсивность фракционирования тяжелого изотопа углерода. Так, растение, произрастающее на открытом солнечном склоне в Лагерном саду (образец № 3) усвоило значительно больше тяжелого изотопа ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} = -24,57$ ‰) по сравнению с растением того же вида, но произрастающим в лесном окружении (образец № 4), для которого при тех же погодных условиях 2015 г. получено значение $\delta^{13}\text{C} = -26,2$ ‰. В 2014 г. в условиях несколько более прохладной весны, по сравнению с 2015 г., одно и то же растение *Salix caprea* в лесном окружении ассимилировало несколько меньшее количество тяжелого изотопа ^{13}C в состав своей пыльцы по сравнению с теплым 2015 г.

Можно отметить, что у 7 древесных видов (*Salix viminalis*, *Salix caprea*, *Populus nigra*, *Populus tremula*, *Ulmus laevis*, *Acer negundo*) при более тёплых погодных условиях апреля (в период начала сокодвижения) происходило более интенсивное усвоение тяжелого изотопа углерода при формировании и развитии пыльцевых зёрен, по сравнению с годом, когда среднемесячная температура апреля была ниже (таблица). В Сибири в периоды межсезонья (весна, осень) декады пониженных температур обычно сочетаются с увеличением количества осадков. Поэтому можно заключить, что наши исследования выявили прямую зависимость обилия стабильного изотопа ^{13}C в пыльце лиственных деревьев от температуры (чем выше температура, тем больше ассимилируется изотопа ^{13}C в пыльце) и подтвердили гипотезу негативной корреляции обилия атмосферных осадков с содержанием ^{13}C в растениях [13, 14] на примере прямого наблюдения зависимости изотопного состава пыльцы от погодных условий.

В данном исследовании мы анализировали изотопный состав отдельных экземпляров растений, поэтому следует говорить об индивидуальной реакции растительных организмов на погодные условия в зависимости от локальных условий их произ-

Таблица. Влияние погодных условий на величину $\delta^{13}\text{C}$ в пыльцевых зёрнах лиственных пород деревьев (виды, цветущие в апреле, выделены жёлтым цветом, в мае – зелёным, в июле – сиреневым)

Table. Influence of weather conditions on value of $\delta^{13}\text{C}$ in pollen grains of deciduous tree species (species flowering in April are marked by yellow, in May – by green, in July – by lilac)

№ образца Sample	Вид Type	Место сбора Collecting point	Время сбора Collecting time	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	$-(\delta^{13}\text{C}\text{‰}+20)$	Средн. t° апреля April mean temperature	Средн. t° мая May mean temperature
1	<i>Salix viminalis</i>	Томск, Академгородок	10.05.2015	-26,64	6,64	5	17
2	<i>Salix viminalis</i>	Томск, Академгородок	29.04.2014	-26,95	6,95	4,4	8,1
3	<i>Salix caprea</i>	Томск, Лагерный сад	01.05.2015	-24,57	4,57	5	17
4	<i>Salix caprea</i>	Томск, Лагерный сад	05.05.2015	-26,2	6,2	5	17
5	<i>Salix caprea</i>	Томск, Академгородок	28.04.2014	-26,83	6,83	4,4	8,1
6	<i>Populus nigra</i>	Томск, город	21.04.1997	-25,9	5,9	7,8	11,3
7	<i>Populus nigra</i>	Томск, город	27.04.2014	-26,99	6,99	4,4	8,1
8	<i>Populus nigra</i>	Томск, город	03.05.2015	-26,45	6,45	5	17
9	<i>Populus tremula</i>	Томск, Академгородок	30.04.2015	-29,28	9,28	5	17
10	<i>Populus tremula</i>	Томск, Академгородок	25.04.2014	-29,45	9,45	4,4	8,1
11	<i>Ulmus laevis</i>	Томск, Лагерный сад	01.05.2015	-26,67	6,67	5	17
12	<i>Ulmus laevis</i>	Томск, Лагерный сад	01.05.2014	-26,93	6,93	4,4	8,1
13	<i>Acer negundo</i>	Томск, город	11.05.2015	-23,45	3,45	5	17
14	<i>Acer negundo</i>	Томск, город	01.05.2003	-26,33	6,33	0,4	9,5
15	<i>Acer negundo</i>	Томск, город	10.05.1990	-25,55	5,55	3,1	13,2
16	<i>Betula pendula</i>	Томск, город	04.05.1990	-25,1	5,1	3,1	13,2
17	<i>Betula pendula</i>	Томск, city	30.04.2015	-26,72	6,72	5	17
18	<i>Betula pendula</i>	Томск, Академгородок	08.05.2015	-26,68	6,68	5	17
19	<i>Betula pendula</i>	Томск, Академгородок	16.05.2015	-28,31	8,31	5	17
		Горелое болото Goreloe swamp					
20	<i>Tilia cordata</i>	Томск, город	14.07.2010	-27,56	7,56	1,3	7,3
21	<i>Tilia cordata</i>	Томск, город	15.07.2014	-28,10	8,1	4,4	8,1
		Томск, city					

растания. Если эти условия одинаковые, то теоретически можно ожидать близкие значения фракционирования изотопа углерода у разных индивидов одного вида. Именно такую картину мы получили для изотопного состава пыльцы, собранной в 2015 г. с двух отдельных берёз, произрастающих в лесном участке Академгородка (образцы № 17 и 18). В нашей коллекции пыльцы берёзы имелся образец, собранный 25 лет назад – в 1990 г. (образец № 16). Изотопный состав пыльцы этого образца содержал больше тяжелого изотопа углерода ($\delta^{13}\text{C} = -25,1\text{‰}$) по сравнению с образцами пыльцы берёзы, собранными в 2015 г., несмотря на то, что апрель 1990 г. был холоднее апреля 2015 г.

Более внимательное рассмотрение метеоданных показывает, что образец № 16 был собран в мае, а образец № 17 – в апреле. Если опираться на среднемесячные температуры тех месяцев, в которые была собрана пыльца берёзы в 1990 и 2015 гг., то отмеченное противоречие между фракционированием изотопа углерода в пыльце берёзы и погодными условиями исчезает. Вероятно, холодный

апрель 1990 г. сменился резким потеплением в мае, в начале которого и была собрана пыльца образца № 16, в результате чего было получено более высокое содержание тяжелого изотопа углерода в данном образце.

По нашим исследованиям не наблюдается отмеченной зависимости между содержанием тяжелого изотопа углерода и погодными условиями весны только у образцов пыльцы липы (образцы № 20 и 21). Скорее всего, это объясняется более поздним цветением (в июле месяце) этого экзотического для сибирской флоры древесного вида. В целом отмеченная закономерность увеличения содержания стабильного изотопа ^{13}C в пыльце лиственных деревьев при более тёплых погодных условиях хорошо просматривается и графически (рисунок), хотя значимого коэффициента корреляции между двумя рядами показателей не получено, не считая ряда, частично захватывающего апрель и частично май (значения, отмеченные жёлтым цветом). Отрицательный коэффициент корреляции этого ряда оказался значим и равен $-0,45$ при $N=17$ и

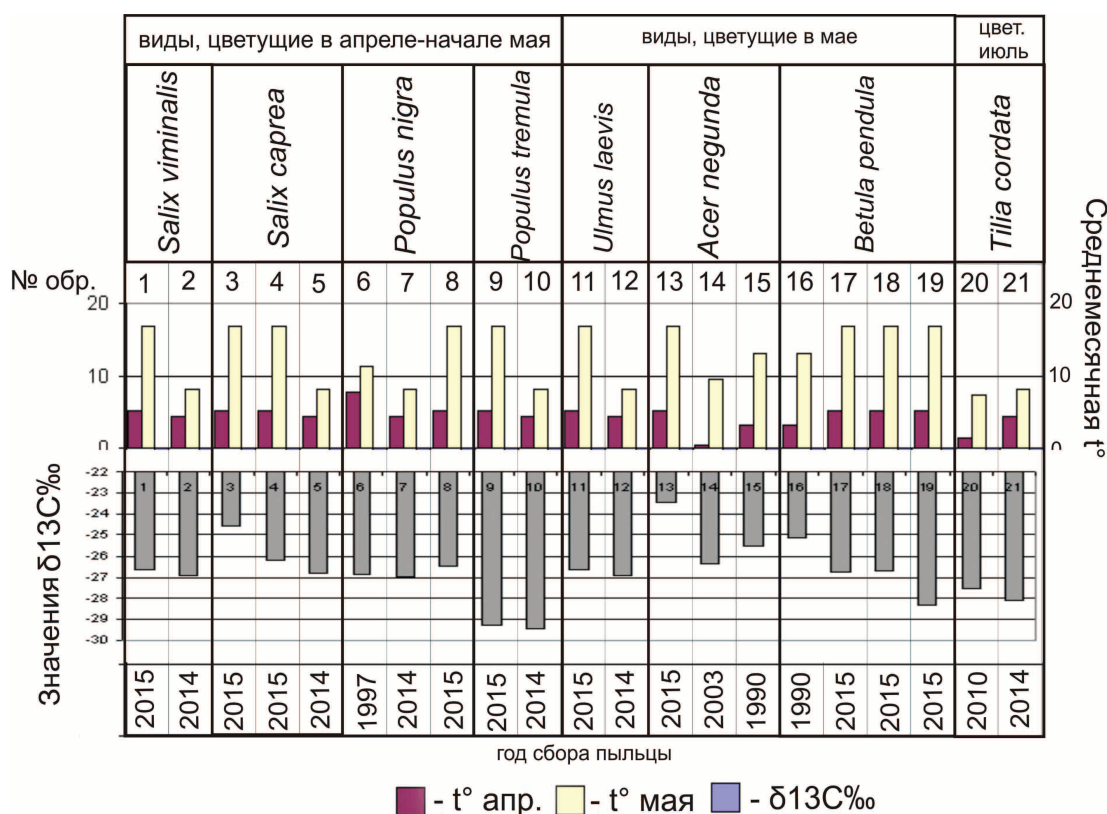


Рисунок. Зависимость величины $\delta^{13}\text{C}$ в пыльце лиственных древесных видов от температурных условий апреля и мая года вегетации

Figure. Dependence of value of $\delta^{13}\text{C}$ in pollen of deciduous tree species on temperature conditions in April and May of year of pollen formation

$p < 0.05$. Учитывая, что рассматриваемые виды растений цветут, сменяя друг друга, в разное время апреля и мая, такая картина вполне логична. Возможно, большая связь может быть получена при использовании не среднемесячных, а подекадных или среднесуточных температур конкретного дня сбора пыльцы.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование изотопного состава углерода в пыльце древесных видов лиственных пород сибирской флоры показало высокую чувствительность метода масс-спектрометрии изотопных отношений, проведенного с помощью элементного анализатора Flash 2000 (ТомЦКП СО РАН) и изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (ТомЦКП СО РАН), позволившего выявить, особенности локальных условий произрастания, физиологическое состояние растительных организмов и их реакцию на погодичную изменчивость температурно-влажностных условий весеннего периода. Исследование показало прямую зависимость обилия стабильного изотопа ^{13}C в пыльце лиственных деревьев от температуры (чем выше температуры, тем больше ассимили-

руется изотопа ^{13}C в пыльце) и обратную зависимость от обилия осадков (чем больше осадков, тем меньше ассимилируется изотопа ^{13}C в пыльце). Ослабленные растения и растения, произрастающие при меньшей солнечной освещенности, ассимилировали заметно меньшее количество изотопа ^{13}C по сравнению со здоровыми растениями, произрастающими в более благоприятных условиях. Лиственные листопадные древесные виды бореальной зоны Сибири эволюционно сформировались в условиях резких сезонных изменений температурных и влажностных характеристик окружающей среды, отсюда, вероятно, их высокая чувствительность к малейшим изменениям весенней погоды. Более сложная зависимость содержания тяжелых изотопов в пыльце от погодных условий наблюдается у хвойных древесных пород, прошедших более длительный эволюционный путь развития [22]. В настоящее время нами продолжается исследование изотопного состава пыльцы хвойных видов флоры Сибири и сопредельных регионов, что в дальнейшем позволит использовать тонкие измерения изотопных отношений в пыльцевой фракции осадков для палеостратиграфических исследований при разведке георесурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stable isotopes in plant ecology / T.E. Dawson, S. Mambelli, A.H. Plamboeck, P.H. Templer, K.P. Tu // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 2002. – № 33. – P. 507–559.
2. Beerling D.J., Royer D.L. Fossil plants as indicators of the Phanerozoic global carbon cycle // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2002. – № 30. – P. 527–556.
3. Физиология растений // Онлайн-энциклопедия. URL: <http://www.fizrast.ru/fotosintez/stapy/prevrashenie-ugleroda/C4-put.html> (дата обращения: 11.10.2015).
4. Schidlowski M. Paleobiological and biogeochemical vestiges of early terrestrial biota: baseline for evaluation of extraterrestrial evidence / B. Hoover et al. // *Perspectives in Astrobiology*. – R IOS Press, 2005. – P. 146–169.
5. Ward J.K., Dawson T.E., Ehleringer J.K. Responses of acer negundo genders to interannual differences in water availability determined from carbon isotope ratios of tree ring cellulose // *Tree Physiology*. – 2002. – № 22 (5). – P. 339–346.
6. Farquhar G.D., Ehleringer J.R., Hubick K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis // *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. – 1980. – № 40. – P. 503–537.
7. Schleser G.H. Parameters determining isotope ratios in plants / B. Frenzel, B. Stauffer, M.M. Weiss // *Paläoklimaforzschung* 15. – Strasburg, 1995. – P. 71–96.
8. Зыкин А.М. Теоретические основы изотопной масс-спектропии в биологии. – Пуццоно: Фотон-век, 2010. – 224 с.
9. Li M.R., Wedin D.A., Tieszen L.L. C-3 and C-4 photosynthesis in Cyperus (Cyperaceae) in temperate eastern North America // *Canadian Journal of Botany*. – 1999. – № 77 (2). – P. 209–218.
10. Scott L. Grassland development under glacial and interglacial conditions in southern Africa: review of pollen, phytolith and isotope evidence // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2002. – № 177 (1–2). – P. 47–57.
11. CO₂- and temperature-controlled altitudinal shifts of C4- and C3-dominated grasslands allow reconstruction of palaeoatmospheric p CO₂ / A. Boom, R. Marchant, H. Hoogheemstra, J.S. Sinninghe-Famste // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2002. – № 177 (1–2). – P. 151–168.
12. Williams T.G., Flanagan L.B. Effect of changes in water content on photosynthesis transpiration and discrimination against ¹³CO₂ and C¹⁸O¹⁶O in Pleurozium and Sphagnum // *Oecologia*. – 1996. – № 108 (1). – P. 38–46.
13. Carbon isotope of bulk organic matter a proxy for precipitation in the arid semiarid central East Asian / X. Lee, Z. Feng, L. Guo, L. Wang, L. Jin, Y. Huang, M. Chopping, D. Huang, W. Jiang, Q. Jiang, H. Cheng // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2005. – № 19 (4). – P. 1–8.
14. Paleovegetation reconstruction using δ¹³C of soil organic matter / G. Wang, X. Feng, J. Hang, L. Zhou, W. Tan, F. Su // *Biogeosciences*. – 2008. – № 5. – P. 1325–1337.
15. Jahren A.H. The carbon stable isotope composition of pollen // *Review of Palaeobotany and Palynology*. – 2004. – № 132. – P. 291–313.
16. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a δ¹³C time series from peat cellulose / Y.T. Hong, Z.G. Wang, H.B. Jiang, Q.H. Lin, B. Hong, Y.X. Zhu, Y. Wang, L.S. Xu, X.T. Leng, H.D. Li // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2001. – № 185. – P. 111–119.
17. Hong B., Lin Q.H., Hong Y.T. Interconnections between the Asian monsoon, ENSO and high northern latitude climate during the Holocene // *Chinese Science Bulletin*. – 2006. – № 51. – P. 11–19.
18. Synchronous climate anomalies in the western North Pacific and North Atlantic regions during the last 14 000 years / Y.T. Hong, B. Hong, Q.H. Lin, Y.X. Shibata, Y.X. Zhu, X.T. Leng, Y. Wang // *Quaternary Science Reviews*. – 2009. – № 28. – P. 840–849.
19. Stable carbon isotope composition of Poaceae pollen and its potential in paleovegetational reconstructions / R.G. Amundsen, R.R. Evett, A.H. Jahren, J. Bartolome // *Review of Palaeobotany and Palynology*. – 1997. – № 99 (1). – P. 17–24.
20. Carbon isotopic ratios of pollen: interest for palaeovegetations reconstructions / C. Descolas-Gros, M. Calleja, P. Cour, P. Richard, C. Perruchetti, P. Jame // *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. Serie III. Fascicule A. Sciences de la Terre et des Planetes*. – 2001. – № 332 (12). – P. 755–760.
21. Loader N.J., Hemming D.L. Spatial variation in pollen δ¹³C correlation with temperature and seasonal development timing // *Holocene*. – 2001. – № 11 (5). – P. 587–592.
22. Крылов Г.В. Леса Западной Сибири. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 225 с.

Поступила 09.11.2015 г.

UDC 581.132.8:582.091:551.515

VARIABILITY OF CONTENT OF STABLE ISOTOPES OF CARBON IN POLLEN OF DECIDUOUS TREE SPECIES DEPENDING ON WEATHER CONDITIONS OF VEGETATIVE SEASON

Tatyana A. Blyakharchuk,

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskii Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: tarun5@rambler.ru

Galina V. Simonova,

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskii Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: galina_simonova@inbox.ru

Olga V. Vetrova,

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskii Avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: vetrovao.v@mail.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to find more robust markers of paleoclimatic change in natural archives (peat, sapropel and mineral sediments) for paleogeographic research in Siberian region, which can be used for verification of stratigraphic structure of sediments during exploration of geological resources.

The main aim of the study: to reveal the prospects of use of stable carbon isotope ^{13}C detected in pollen of deciduous tree species of Siberian flora for paleoclimatic investigations.

The methods used in the study: for this aim the amount of stable carbon isotope ^{13}C was detected in pollen of eight tree species from deciduous clade collected in different years and compared with weather condition of spring time during year of pollen collection. Dry cleaned pollen of selected tree species was burned in redox reactor of element analyzer Flash 2000. CO_2 emitted during combustion was analyzed in isotope mass-spectrometer DELTA Advantage in Tom CCU SB RAS. The results of stable isotope measurements were compared later with average month temperatures of April and May mentioned for year when pollen was collected.

The results. The authors found that content of stable carbon isotope ^{13}C in pollen of deciduous trees of Siberian flora is a perspective indicator of weather conditions during pollen maturation and hence for paleoclimatic research. The investigation showed straight dependence of amount of stable carbon isotope ^{13}C in pollen of deciduous trees on temperature (higher the temperature in period of maturation of pollen was, more ^{13}C isotope was accumulated by plants) and reverse dependence on amount of precipitation (more precipitation was during maturation of pollen, less carbon isotope ^{13}C was accumulated by plants). Weakened plants and plants growing under less sunlight conditions accumulated notably less amount of stable carbon isotope ^{13}C in comparison with healthy plants growing in more favorable environments.

Key words:

Pollen, tree species, carbon stable isotope ^{13}C , isotopic fractionation of stable isotopes, temperature, precipitation, paleoclimate.

REFERENCES

- Dawson T.E., Mambelli S., Plamboeck A.H., Templer P.H., Tu K.P. Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, no. 33, pp. 507–559.
- Beerling D.J., Royer D.L. Fossil plants as indicators of the Phanerozoic global carbon cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2002, no. 30, pp. 527–556.
- Fiziologiya rasteniy [Physiology of plants]. Available at: <http://www.fizrast.ru/fotosintez/stapy/prevrasheniye-ugleroda/C4-put.html> (accessed 11 October 2015).
- Schidlowski M. Paleobiological and biogeochemical vestiges of early terrestrial biota: baseline for evaluation of extraterrestrial evidence. In B. Hoover et al. (Eds.). *Perspectives in Astrobiology*. R IOS Press, 2005. pp. 146–169.
- Ward J.K., Dawson T.E., Ehleringer J.K. Responses of acer negundo genders to interannual differences in water availability determined from carbon isotope ratios of tree ring cellulose. *Tree Physiology*, 2002, no. 22 (5), pp. 339–346.
- Farquhar G.D., Ehleringer J.R., Hubick K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1980, no. 40, pp. 503–537.
- Schleser G.H. Parameters determining isotope ratios in plants. In B. Frenzel, B. Stauffer, M.M. Weiss (Eds.) *Paläoklimaforzschung 15*. Strasburg, 1995, pp. 71–96.
- Zykin A.M. *Teoreticheskie osnovy izotopnoy mass-spektroskopii v biologii* [Theoretical bases of isotopic mass-spectroscopy in biology]. Pushchino, Foton-vek Publ., 2010. 224 p.
- Li M.R., Wedin D.A., Tieszen L.L. C-3 and C-4 photosynthesis in Cyperus (Cyperaceae) in temperate eastern North America. *Canadian Journal of Botany*, 1999, no. 77 (2), pp. 209–218.
- Scott L. Grassland development under glacial and interglacial conditions in southern Africa: review of pollen, phytolith and isotope evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, no. 177 (1–2), pp. 47–57.
- Boom A., Marchant R., Hoogheemstra H., Sinninghe-Famste J.S. CO_2 - and temperature-controlled altitudinal shifts of C4- and C3-dominated grasslands allow reconstruction of palaeoatmospheric $p\text{CO}_2$. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, no. 177 (1–2), pp. 151–168.
- Williams T.G., Flanagan L.B. Effect of changes in water content on photosynthesis transpiration and discrimination against $^{13}\text{CO}_2$ and $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ in Pleurozium and Sphagnum. *Oecologia*, 1996, no. 108 (1), pp. 38–46.
- Lee X., Feng Z., Guo L., Wang L., Jin L., Huang Y., Chopping M., Huang D., Jiang W., Jiang Q., Cheng H. Carbon isotope of bulk organic matter a proxy for precipitation in the arid semiarid central East Asian. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, no. 19 (4), pp. 1–8.
- Wang G., Feng X., Hang J., Zhou L., Tan W., Su. F. Paleovegetation reconstruction using $\delta^{13}\text{C}$ of soil organic matter. *Biogeosciences*, 2008, no. 5, pp. 1325–1337.
- Jahren A.H. The carbon stable isotope composition of pollen. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2004, no. 132, pp. 291–313.
- Hong Y.T., Wang Z.G., Jiang H.B., Lin Q.H., Hong B., Zhu Y.X., Wang Y., Xu L.S., Leng X.T., Li H.D. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a $\delta^{13}\text{C}$ time series from peat cellulose. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, no. 185, pp. 111–119.
- Hong B., Lin Q.H., Hong Y.T. Interconnections between the Asian monsoon, ENSO, and high northern latitude climate during the Holocene. *Chinese Science Bulletin*, 2006, no. 51, pp. 11–19.
- Hong Y.T., Hong B., Lin Q.H., Shibata Y.X., Zhu Y.X., Leng X.T., Wang Y. Synchronous climate anomalies in the western North Pacific and North Atlantic regions during the last 14 000 years. *Quaternary Science Reviews*, 2009, no. 28, pp. 840–849.
- Amundsen R.G., Evett R.R., Jahren A.H., Bartolome J. Stable carbon isotope composition of Poaceae pollen and its potential in paleovegetational reconstructions. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1997, no. 99 (1), pp. 17–24.
- Descolas-Gros C., Calleja M., Cour P., Richard P., Perruchietti C., Jame P. Carbon isotopic ratios of pollen: interest for palaeovegetations reconstructions. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. Serie III. Fascicule A. Sciences de la Terre et des Planetes*, 2001, no. 332 (12), pp. 755–760.
- Loader N.J., Hemming D.L. Spatial variation in pollen $\delta^{13}\text{C}$ correlation with temperature and seasonal development timing. *Holocene*, 2001, no. 11 (5), pp. 587–592.
- Krylov G.V. *Lesa Zapadnoy Sibiri* [Forests of West Siberia]. Moscow, AS USSR Publ., 1961. 225 p.

Received: 9 November 2015.