

шивкам эпоксидной смолы при отверждении и способствовала формированию дефектной структуры.

Таким образом, проведенные исследования показали, что введение комбинированного наполнителя на основе природного цеолита и борной кислоты в эпоксидную смолу приводит к улучшению термической стойкости эпоксидных композитов. Для практического применения необходимо учитывать изменение механических характеристик образцов и провести дополнительные исследования.

Список литературы:

1. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. – Киев: Наукова думка, 1981. – 207 с.
2. Смирнская В.Н. Цеолитсодержащие вяжущие повышенной водостойкости и изделия на их основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1998. – 23 с.
3. Варков Р.И. Использование природных цеолитов для повышения пожарной безопасности строительных конструкций и технологического оборудования: Дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2002. – 161 с.
4. Назаренко О.Б., Мельникова Т.В. Термическая стабильность эпоксидных композитов, наполненных высокодисперсными порошками сахаптинского цеолита // Полифункциональные химические материалы и технологии: Материалы Международной научной конференции. В 2-х томах, Томск, 21-22 Мая 2015. – Томск: ТГУ, 2015. – Т. 2. – С. 169–171.
5. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. – М.: Химия, 1980. – 274 с.
6. Мельникова Т.В., Назаренко О.Б. Влияние борной кислоты на характеристики горючести эпоксидных полимеров // Вестник науки Сибири. – 2015. – № Спецвыпуск (15). – С. 108–112.

Датирование ледовой изотопной хронологии по древесно-кольцевым изотопным хронологиям

Акулов П.А.^{1,2}, Волков Ю.В.^{1,2}, Тартаковский В.А.²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, г. Томск,
E-mail: pitakul@mail.ru

Длительные ряды экспериментальных данных, характеризующих природно-климатические изменения, создают объективные основы для их прогноза. В силу отсутствия прямых измерений традиционных характеристик климата, до момента появления этой возможности, актуально ввести в оборот то, что имеет временную привязку, связано с элементами климата и осталось неизменным. В этом смысле перспективным является отношение концентраций изотопов кислорода $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, которое фиксируется в древесине годовых колец, в годовых слоях ледников и зависит от температуры воздуха. Изотопные данные используются в виде $\delta^{18}\text{O} = 10^3(R_p - R_{\text{SMOW}})/R_{\text{SMOW}}\text{‰}$, отражающем их соотношение в пробе древесины $R_p = (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_p$, по отношению к стандарту SMOW (Standard Mean Ocean Water; $R_{\text{SMOW}} = (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}$. Обогащение целлюлозы растений изотопом ^{18}O происходит вследствие процесса фракционирования, имеющего как физическую, так и биохимическую составляющие. В этот процесс вовлекается кислород из атмосферной углекислоты и воды. Изотопный состав почвенной влаги определяется таковым выпадающих атмосферных осадков. W. Dansgaard [1] выделил сезонные, широтные, континентальные и высотные особенности распределения изотопного состава осадков. Общим свойством этих распределений является уменьшение величины $\delta^{18}\text{O}$ в осадках при продвижении в глубь континента и в высокие широты, при подъеме в высоту, а также с понижением температуры. Так, $\delta^{18}\text{O}$ океанической воды как стандарт (SMOW) равно 0,0‰, а на севере Евразии среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков находятся в диапазоне от –10 до –24‰ [2].

Из физических факторов фракционирования изотопов наиболее значимым является утяжеление кислорода внутриклеточной воды при повышении температуры по сравнению с почвенной влагой, вследствие первоочередного удаления из воды, содержащейся в растениях, легкого изотопа кислорода в процессе транспирации.

Миграция и фиксация стабильных изотопов кислорода в живой и неживой природе изучены недостаточно. Тем не менее принято, что изотопный состав целлюлозы растений определяется, прежде всего, таковым исходной воды, а наиболее значимым фактором, влияющим на этот состав, является температура, которая определяет условия протекания как физических, так

и биологических процессов фракционирования. В свою очередь изотопный состав выпадающих атмосферных осадков, из которых формируются вода растений и ледники, зависит от процессов испарения и конденсации, которые определяются температурой и весом молекул.

В работе использованы следующие изотопные хронологии лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.): IRK (окрестности г. Иркутска; 52°14' с.ш., 104°11' в.д., 450 м над ур.м., период 1682–1998 гг.); OLC (о. Ольхон; 53°17' с.ш., 107°38' в.д., 530 м над ур.м., период 1659–2001 гг.); DAV (Байкальский хребет; 55°51' с.ш., 108°55' в.д., 1400 м над ур.м., период 1388–2000 гг.). Местообитания, в которых была отобрана древесина для изотопного анализа, различаются по основным климатическим характеристикам.

Изотопные характеристики кернов льда из гренландской скважины GISP2 используют для выявления изменений климата в Северном полушарии в далеком прошлом [3]. Хронологии из кернов соотнесены с официальной временной шкалой – Meese/Sowers timescale. Датировка кернов производилась вычислением отношения «глубина/возраст» с помощью различных методов и параметров: путем визуальной стратиграфии, расчетом концентрации стабильных изотопов кислорода и главных анионов и катионов, электропроводности, радиоуглеродным датированием и т.д. [4, 5]. Тем не менее не удается установить точного соответствия слоев ледового керна календарным годам. По самым оптимистичным оценкам погрешность оценки возраста слоев льда составляет около 2% для временного периода 0–11640 лет от настоящего времени [4].

Устранение этих погрешностей возможно применением для корректировки ледовых хронологий других длительных палеохронологий [6].

Древесно-кольцевые $\delta^{18}\text{O}$ -хронологии имеют абсолютную датировку и могут стать репером для ледовых хронологий. Использование такого параметра, как ширина годичного кольца из древесно-кольцевых хронологий Субарктики Евразии для корректировки ледовых изотопных хронологий Гренландии, показало разумность данного подхода [7]. Вполне целесообразно использовать для этих целей и древесно-кольцевые $\delta^{18}\text{O}$ -хронологии, которые впервые были получены нами для Северной Евразии.

Необходимо сопоставить известную ледовую $\delta^{18}\text{O}$ -хронологию, полученную из кернов льда скважины GISP2, с наиболее длительной древесно-кольцевой $\delta^{18}\text{O}$ -хронологией DAV (650 лет). При этом принимается во внимание то, что древесно-кольцевые хронологии имеют абсолютную календарную датировку, в то время как ледовые хронологии не имеют реального погодичного разрешения. Будем исходить из того, что вышеописанные экспериментальные данные, хотя и разрозненные, не противоречат гипотезе о наличии естественного механизма синхронизации хронологий, который может быть обусловлен глобальностью вынуждающего воздействия. При этом пространственное усреднение за счет перемешивания водного аэрозоля в атмосфере и временное за счет перемешивания материала кернов подавляет флуктуации.

Изотопные древесно-кольцевая и ледовая хронологии характеризуют изменения одной и той же физической величины – концентрации изотопа ^{18}O во времени в двух достаточно удаленных точках на земной поверхности.

Эти хронологии будем рассматривать как смесь полезного климатического сигнала и шума. Последний связан с естественными локальными флуктуациями концентраций изотопа, с сезонными особенностями фиксации изотопов в леднике и в древесине и др. Однако более значимым источником шума является погрешность в датировке слоев ледовых кернов [8]. Модель этой погрешности представим как некоторую трансформацию временной шкалы путем ее сжатия и растяжения, но без разрывов и смещений. В рамках предлагаемой нами модели предполагается, что неправильная датировка кернов льда приводит к десинхронизации хронологий (рис. 1). Естественно ее подавить обратной трансформацией временной шкалы. Такие подходы обсуждались и применялись ранее [8–11].

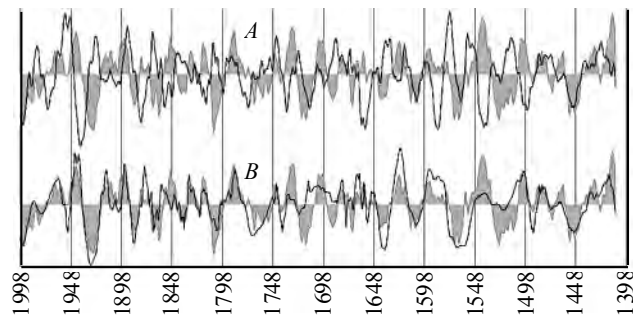


Рис. 1. 11-летние нормированные средние значения $\delta^{18}\text{O}$ (хронология DAV – серый фон, хронология GISP2 – кривая): *A* – исходные хронологии, коэффициент корреляции равен $-0,07$; *B* – содержание изотопа в ледяном керне датировано предлагаемым методом по хронологии DAV, коэффициент корреляции равен $0,66$. На оси абсцисс отложены годы.

В данной статье для решения задачи применяется новая вычислительная процедура на основе алгоритма «сжатие – растяжение» [10, 11], который реализует однозначное, непрерывное и обратимое преобразование колебательного процесса.

На первом этапе процедуры автоматически определяются две последовательности координат значимых экстремумов обеих хронологий. При этом имеется возможность интерактивного редактирования этих последовательностей. Затем обе последовательности интерполируются сплайнами и получают функции, имеющие смысл фаз хронологий как колебательных процессов. Для полученных функций фаз находят обратные функции путем вращения исходных фаз вокруг биссектрисы первого квадранта системы координат. Все эти операции возможны, когда функции фаз априорно монотонны и имеют ограниченную сверху производную.

На втором этапе вычислений производится прямая операция «сжатие – растяжение» ледовой хронологии (GISP2). При этом используется ее обратная фаза. Затем выполняется обратная операция «сжатие – растяжение» с использованием фазы для древесно-кольцевой хронологии (DAV). Тем самым обе хронологии синхронизируются.

После синхронизации коэффициент корреляции ледовой и древесно-кольцевой хронологий существенно возрос от $-0,07$ до $0,66$ и приблизился к коэффициентам, полученным для хронологий Прибайкалья длительностью 318 лет. Этот факт подтверждает, что коэффициент корреляции в данном случае может служить мерой глобального вынуждающего воздействия.

Таким образом, приняв гипотезу о наличии природного механизма синхронизации хронологий и предложив модель погрешности датировки, мы получили обоснование применения нашего алгоритма «сжатие – растяжение» и показали возможность корректировки ледовых изотопных хронологий по древесно-кольцевым изотопным хронологиям.

Список литературы:

1. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 16. N 4. P. 436–468.
2. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геохронологии и гляциологии: Учебник. М.: Моск. ун-т, 2000. 616 с.
3. Johnsen S.J., Clausen H.B., Dansgaard W., Gundestrup N.S., Hammer C.U., Andersen U., Andersen K.K., Hvidberg C.S., Dahl-Jensen D., Steffensen J.P., Shoji H., Sveinbjornsdottir A.E., White J.W.S., Jouzel J., Fisher D. The $\delta^{18}\text{O}$ record along the Greenland Ice Core Project deep ice core and the problem of possible Emian climatic instability // *J. Geophys. Res. C*. 1997. V. 102. N 12. P. 26397–26410.
4. Alley R.B., Shuman C.A., Meese D.A., Gow A.J., Taylor K.C., Cuffey K.M., Fitzpatrick J.J., Grootes P.M., Zielinski G.A., Ram M., Spinelli G., Elder B.C. Visual-stratigraphic dating of the GISP2 ice core: Basic, reproducibility, and application // *J. Geophys. Res. C*. 1997. V. 102. N 12. P. 26367–26381.
5. Meese D.A., Alley R.B., Fiacco R.J., Germani M.S., Gow A.J., Grootes P.M., Illing M., Mayewski P.A., Morrison M.C., Ram M., Taylor K.C., Yang Q., Zielinski G.A. Preliminary depth-agescale of the GISP2 ice core. Special CRREL Report 94-1. 1994. US.
6. Schwander J. Dating ice cores // *PAGES News*. 2006. V. 14. N 1. P. 21–22.
7. Сидорова О.В., Наурызбаев М.М., Ваганов Е.А. Динамика климата позднего голоцена севера Евразии по данным ледниковых кернов Гренландии и длительных древесно-кольцевых хронологий // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2007. № 1. С. 95–106.
8. Наурызбаев М.М. Дендроклиматический анализ длительных изменений температурного режима в Субарктике Евразии: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2005. 38 с.
9. Southon J. A first step to reconciling the GRIP and GISP2 Ice-Core chronologies // *Quat. Res.* 2002. N 57. P. 32–37.
10. Тартаковский В.А. Условия причинности и демодуляция оптических сигналов с монотонной фазой // *Оптика атмосф. и океана*. 2002. Т. 15. № 1. С. 91–100.
11. Тартаковский В.А., Исаев Ю.Н., Несветайло В.Д., Волков Ю.В., Попов В.Н. Математическая модель радиального сечения годовых колец деревьев // *Автометрия*. 2003. Т. 38. № 5. С. 118–127.