

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОЗОЛЕНИИ КОСТНОЙ ТКАНИ

М.А. Дериглазова, Л.П. Рихванов*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

РЕЗЮМЕ. Цель работы – В связи с возрастанием интереса к изучению живого вещества, растет число исследований элементного состава биосубстратов человеческого организма с использованием озолённого материала. При этом чрезвычайно важно знать, насколько состав озолённого материала отражает состав исходного объекта, и как ведут себя элементы в процессе сгорания. Для ответа на поставленные вопросы был проведен эксперимент по сжиганию проб биологического материала. Цель работы – анализ поведения элементов в процессе высокотемпературного озолёния костной ткани. В ходе проведения эксперимента использованы следующие методы анализа: инструментальный нейтронно-активационный и масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. Исследование показывает, что большинство элементов концентрируются в золе костной ткани при сжигании (Li, Na, Mg, P, Ca, Ti, Cu, Zn, Ga, U, Al, Sc, Cr, Mn, Fe, As, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, La, Ce, Pr, Sm, Gd, Au, W, Bi), тогда как улетучивание наблюдается только для Br, Hg и Sn. Показана исключительная роль формы нахождения элемента для анализа его поведения. В процессе исследования роли температуры сгорания костной ткани для предсказания его поведения установлено, что более низкая температура озолёния (500 °С) ведет к более интенсивному улетучиванию элементов из костной ткани. В статье также предложен алгоритм пересчета содержания ряда элементов в золе костной ткани на сухое вещество. При этом установлены зависимости содержания элементов в золе от их содержания в сухой ткани (для Fe, Mg, Zn, As, Pr, Ce, W, Zr, Cd, Cr, Sb, Mn, Ga, Nb, Pb и U), поддающиеся описанию с помощью математических функций с высокой достоверностью аппроксимации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поведение элементов, зола, костная ткань, озолёние.

ВВЕДЕНИЕ

Биосубстраты человека и животных (волосы, кровь, шерсть и др.) активно используются в современной науке для определения элементного статуса, так как отражают содержание многих элементов в исследуемом организме (Афтанас и др., 2010; Скальный, 2016, 2019). По мнению различных авторов, для выявления определённых региональных или индивидуальных микроэлементов хорошо подходят и другие биосубстраты человеческого организма, такие как кости, зубы, а также некоторые другие органы и ткани (Кораго, 1992; Сокол и др., 2004, 2007; Крымова и др., 2007; Крымова и др., 2007; Ламанова, 2010). Однако изучение данных объектов зачастую ограничено ввиду трудностей, связанных с отбором и хранением такого материала. Кроме того, ничтожно малые концентрации ряда элементов, в особенности редкоземельных и радиоактивных в сыром веществе, зачастую не

позволяют определять их содержание в сыром органе и ткани. Для решения данных проблем ученые прибегают к различным видам температурного воздействия на исследуемое вещество: осушению и озолёнию.

Возможность применения озолённых органов и тканей человека для определения элементного портрета жителей некоторых городов России активно изучается научным коллективом Отделения геологии Томского политехнического университета (Игнатова, 2010; Рихванов и др., 2017). В течение последних лет предметом исследования является элементный и минеральный состав зольного остатка организма человека (ЗООЧ) – крематорного материала, оставшегося после сжигания тела человека. Исследование столь необычного материала кроме очевидных его достоинств (исследование элементного состава всего организма человека, изучение некоторых редкоземельных и радиоактивных элемен-

* Адрес для переписки:

Дериглазова Мария Александровна
E-mail: belyakinama@gmail.com

тов и других) ставит перед исследователями вполне обоснованные вопросы: насколько озолённый материал отражает реальный состав организма человека; какие изменения происходят с составом органов и тканей при озолении вещества? Для ответа на данные вопросы проведен эксперимент по изучению поведения элементов в процессе сжигания костной ткани.

Цель исследования – изучение особенностей поведения элементов в процессе высокотемпературного озоления костной ткани, а также провести анализ возможности пересчета содержания элементов в золе на сухое вещество.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения эксперимента были отобраны пробы костной ткани свиньи домашней, выращенной в разных регионах России, а также элементы пяточной и бедренной кости человека. Исследуемый материал был представлен в основном смесью компактного и губчатого вещества, за исключением пяточной кости человека, где было исследовано исключительно губчатое вещество.

В процессе проведения эксперимента моделировались условия, приближенные к крематорным по температуре и исследуемому веществу. Результаты предыдущих исследований показывают, что основной минеральной фазой, обнаруживающейся в пробах ЗООЧ, является гидроксилпатит – главный минерал костной ткани (Дериглазова и др., 2017). Именно поэтому для проведения эксперимента была выбрана костная ткань.

Образцы костной ткани высушивали при температуре 100 °С в течение 3 ч. Затем каждый образец кости был разделен на две части. Первая часть представляла собой высушенную костную ткань. Вторая часть была подвергнута более высокому температурному воздействию – озолалась в течение 2 ч при температуре, соответствующей процессу сжигания тела в крематорной печи при 1000–1100 °С. Дополнительно некоторые пробы были сожжены при температуре 500 °С. Определение зольности исследуемого материала осуществляли весовым методом. Полученные образцы были упакованы и отправлены для проведения элементного анализа.

Элементный состав сухой и озоленной костной ткани изучали методами инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА), и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Метод ИНАА был реализован на базе Исследовательского

ядерного реактора Томского политехнического университета, в аккредитованной лаборатории (Аттестат аккредитации RA.RU.21AB27 от 08.04.2015). Определение концентраций 28 химических элементов данным методом проводили согласно аттестованной Росстандартом методике МКХА НСАМ № 510-ЯФ «Определение микроэлементов в горных породах, рудах, почвах, донных отложениях, золах растений, углях и в твердых биологических материалах растительного и животного происхождения нейтронно-активационным методом» аналитиками А.Ф. Судыко, Л.Ф. Богутской. Элементный анализ выполняли методом ИСП-МС в «Химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск (Аттестат аккредитации RA.RU.516895 от 24.03.2016). Концентрации 62 химических элементов определяли в исследуемом материале согласно одобренной Минздравом России методике МУК 4.1.1483-03 «Определение содержания химических элементов в диагностических биосубстратах, препаратах и биологически активных добавках методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой». Правильность полученных данных проверяли результатами внутреннего контроля, а также сходимостью результатов ИНАА и ИСП-МС, которая является удовлетворительной. Указанными методами проанализировано 43 образца сухой и озоленной костной ткани. Количество экспериментальных случаев составило 7 для элементов, концентрации которых определяли с помощью метода ИСП-МС и 10 – для элементов, определенных с помощью метода ИНАА

Полученные данные о составе сухого и озоленного вещества сравнивали друг с другом и анализировали с учетом зольности проб. Статистическую и аналитическую обработку данных проводили с помощью пакетов программ «Microsoft Excel» и «Statistica».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используемые методы анализа позволили определить содержание в пробах костной ткани 62 химических элементов, при этом 20 из них – ниже предела обнаружения в 50–100% исследованных случаев (Co, Ni, Rb, Ag, In, Cs, Sm, Eu, Te, Tb, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Re, Au, Th). Выборки многих элементов крайне неоднородны, а их распределение подчиняется логнормальному закону, что, вероятно, отражает индивидуальные, патологические и региональные особенности исследуемых проб.

Таблица 1. Среднее содержание химических элементов
в пробах сухой и озолённой костной ткани

Сухая костная ткань				Озолённая костная ткань			
Элемент	Содержание, мг/кг	Элемент	Содержание, мг/кг	Элемент	Содержание, мг/кг	Элемент	Содержание, мг/кг
Li	0,69	In	0,001	Li	5,0	In	0,001
Be	0,063	Sn	0,14	Be	0,059	Sn	0,04
Na*	$\frac{4912}{5200}$	Sb*	0,084	Na*	$\frac{7864}{9100}$	Sb*	0,11
Mg	$\frac{3176}{2600}$	Te	0,013	Mg	$\frac{4455}{4600}$	Te	0,013
Al	79	Cs*	0,008	Al	93	Cs*	0,005
P	$\frac{106731}{103000}$	Ba*	4,1	P	$\frac{161317}{180000}$	Ba*	15
K	413	La*	0,011	K	384	La*	0,04
Ca	$\frac{228445}{225000}$	Ce*	0,11	Ca	$\frac{325126}{394000}$	Ce*	0,31
Sc*	0,007	Pr	0,011	Sc*	0,023	Pr	0,016
Ti	5,2	Nd*	0,6	Ti	9,8	Nd*	0,46
V	0,27	Sm*	0,046	V	0,47	Sm*	0,088
Cr*	5,6	Eu*	0,007	Cr*	8,39	Eu*	0,006
Mn	9,6	Gd	0,006	Mn	10,8	Gd	0,013
Fe*	770	Tb*	0,010	Fe*	1129	Tb*	0,008
Co*	0,108	Dy	0,007	Co*	0,27	Dy	0,008
Ni	нпо	Ho	0,005	Ni	нпо	Ho	0,005
Cu	4,0	Er	0,006	Cu	8,3	Er	0,007
Zn*	280	Tm	нпо	Zn*	406	Tm	нпо
Ga	0,52	Yb*	нпо	Ga	0,75	Yb*	нпо
Ge	0,008	Lu*	0,008	Ge	0,013	Lu*	0,015
As*	0,752	Hf*	0,024	As*	0,89	Hf*	0,013
Se	0,15	Ta	0,020	Se	0,22	Ta	0,018
Br*	2,6	W	0,15	Br*	0,025	W	0,17
Rb*	0,241	Re	нпо	Rb*	0,12	Re	нпо
Sr*	8,5	Au*	0,001	Sr*	8,7	Au*	0,002
Y	0,024	Hg	0,22	Y	0,043	Hg	0,011
Zr	0,10	Tl	0,003	Zr	0,25	Tl	0,002
Nb	0,022	Pb	5,7	Nb	0,027	Pb	6,2
Mo	0,19	Bi	0,020	Mo	1,2	Bi	0,22
Ru	0,006	Th*	0,006	Ru	0,010	Th*	0,007

П р и м е ч а н и е : элементы, отмеченных знаком «*», определены методом ИНАА, остальные – методом ИСП–МС; НПО – элемент определен ниже предела обнаружения в 100% проб. Жирным шрифтом отмечены элементы, концентрация которых определена ниже предела обнаружения в 50% проб и более. Для Ca, P, Na, Mg, K в знаменателе приведены литературные данные по содержанию данных элементов в костной ткани (Zipkin, 1970).

Полученные данные показывают, что элементный состав исследуемых образцов приближен к литературным данным по содержанию основных компонентов (Ca, P, Na, Mg, K) в сухой и озолённой костной ткани. Индикаторное отношение Ca/P в сухой костной ткани составляет 2,1, уменьшаясь при озолении до 2,0, что приближено к отношению данных элементов в биологическом гидроксилapatите (2,1), а также укладывается в рамки (0,9–2,2), установленные различными исследователями для данного показателя в сухой и озоленной кости (Ньюман, 1961; Zipkin, 1970; Беттс, 1981; Герк и др., 2015).

При сравнении среднего содержания элементов в сухих и озолённых пробах (табл. 1) установлено, что большинство из них при сжигании концентрируются в костной золе. То есть содержание элементов в золе костной ткани выше, чем в сухом веществе. При рассмотрении экспериментальных случаев выявлено, что Li, Na, Mg, P, Ca, Ti, Cu, Zn, Ga и U концентрируются в золе по сравнению с сухим веществом в 100% исследованных случаев (рис. 1,а–з). Для

таких элементов, как Al, Sc, Cr, Mn, Fe, As, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, La, Ce, Pr, Sm, Gd, Au, W и Bi тенденция концентрирования при сжигании наблюдалась в 71–85% экспериментальных случаев. При этом летучесть элементов установлена только для Br и Hg (рис. 1,д,е), которые концентрируются в сухом веществе по сравнению с золой в 100% случаев, и Sn – в 71% случаев. Для других изученных элементов (K, V, Co, Ni, Ge, Se, Rb, Sr, Ru, Ag, In, Cs, Ba, Nd, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Re, Tl, Pb и Th) сделать вывод о поведении при озолении костной ткани не представляется возможным из-за ряда причин. К таковым относятся: крайне низкая концентрация некоторых элементов в кости, а также отсутствие единой тенденции поведения данных элементов в процессе сжигания.

Обобщая имеющиеся работы в области изучения поведения элементов при сжигании органического вещества (Русанов, 1948; Зайдель и др., 1960; Тёрёк и др., 1982; Vassilev et al., 2013 и др.), можно заключить, что основным фактором, влияющим их летучесть, является форма нахождения.

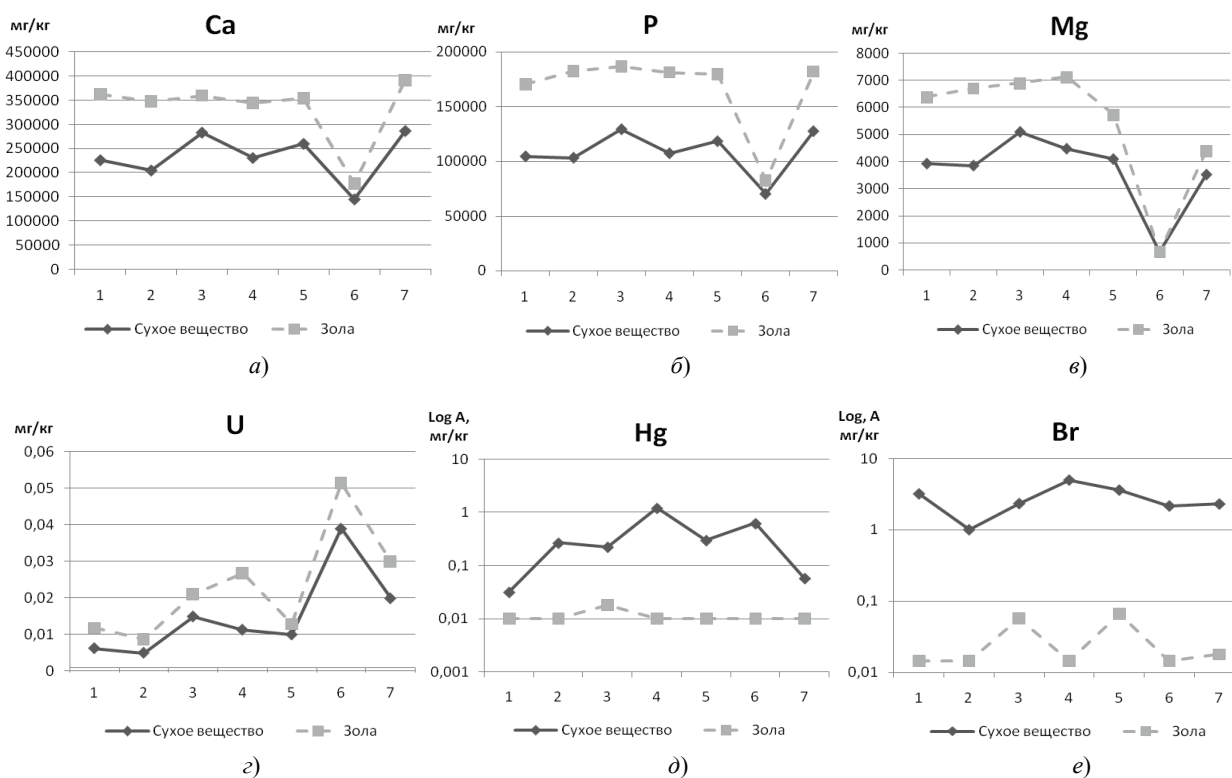


Рис. 1. Содержание элементов в костной ткани до и после озоления, мг/кг:
а – кальций; б – фосфор; в – магний; г – уран; д – ртуть; е – бром
(цифры 1–7 – различные случаи исследования костной ткани)

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что элементы, имеющие тенденцию к накоплению в костной ткани при озолении, находятся в исследуемом материале в виде одного или нескольких малолетучих соединений. Вероятно, их концентрирование происходит за счет выгорания органической составляющей. Данное предположение подтверждается тем фактом, что элементы, входящие в состав кости в виде основного минерала костной ткани – гидроксилпатита (Ca, P, Mg) ведут себя при сжигании костной ткани аналогичным образом (рис. 1).

Таким образом, элементы, однозначную тенденцию поведения которых установить не удалось, вероятно, находятся в костной ткани в виде разных соединений, ведущих себя при озолении различным образом.

Среди летучих элементов не вызывает сомнения поведение ртути и брома, которые, согласно данным исследователей, обладают мак-

симальной летучестью, а их потери при озолении живого вещества составляют 95–100% для ртути, 80–90% для брома (Vassilev et al., 2013). Но наряду с данными элементами, чрезвычайно летучим, по данным исследователей, признан мышьяк (потери от 25 до 90% при озолении живого вещества), который в нашем случае в основном концентрируется в золе. Таким образом, мышьяк в костной ткани предположительно находится в составе труднолетучих соединений.

Очевидно, что различные соединения элементов имеют разную температуру плавления, поэтому температура сгорания также является значительным фактором, определяющим поведение элементов при озолении костной ткани. Это демонстрирует диаграмма содержания элементов в пяточной кости, подверженной воздействию различных температур (рис. 2), где наблюдается различный характер поведения многих элементов при сжигании костной ткани при температурах 500 и 1100 °С.

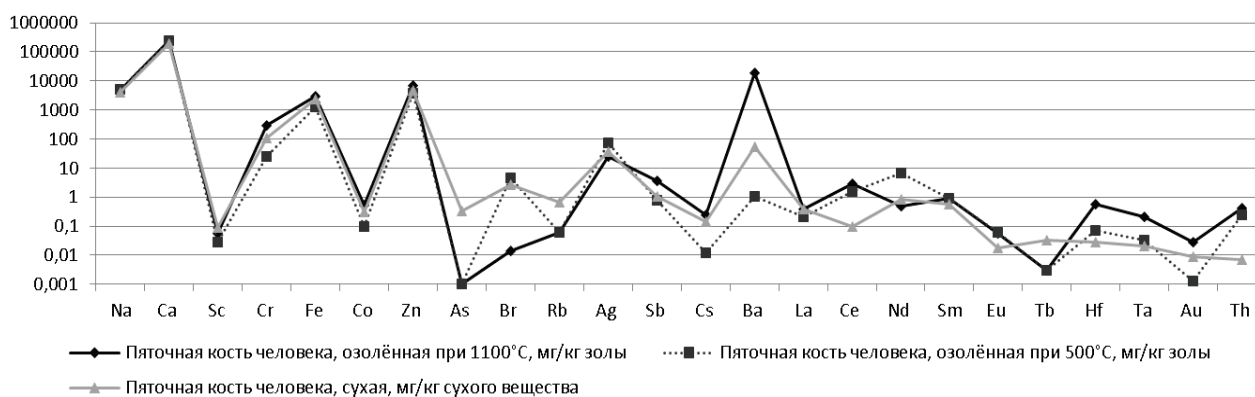


Рис. 2. Содержание элементов, определенных методом ИНАА, в пяточной кости человека, подверженной воздействию различных температур

Среди всех элементов можно отметить следующие наиболее выделяющиеся группы: Ca, Ce, Hf, Ta, Th, концентрация которых увеличивается по мере роста температуры; Cr, Fe, Co, Zn, Sb, Cs, Ba, Au, для которых наблюдается улетучивание при 500 °С и концентрирование при 1000 °С. Обращает на себя внимание группа элементов (Br, Ag, Nd), которые ведут себя противоположно: улетучиваются при 1100 °С, однако концентрируется по сравнению с сухим веществом при более низкой температуре сгорания. Учитывая, что температура кипения элементарного брома не превышает 60 °С, главным фактором, определяющим такое поведение элемента, является форма его нахождения. Вероятно, в

костной ткани данный элемент находится в таком соединении, температура кипения (возгонки) которого начинается с 500 °С и выше, тогда как до указанной температуры его концентрирование происходит, главным образом, за счет выгорания органического вещества.

В целом полученные данные показывают, что при сжигании костной ткани при температуре 500 °С наблюдается улетучивание 14 элементов из 20, тогда как при температуре 1100 °С – только 9.

Таким образом, при более низких температурах озоления костной ткани наблюдается более интенсивное улетучивание элементов из исследуемого материала.

Для оценки возможности пересчета содержания элементов в золе на сухое вещество была изучена степень концентрирования элементов в процессе озоления. Степень концентрирования/улетучивания элемента показывает, во сколько раз изменилась концентрация элемента при озолении костной ткани, и рассчитывается как отношение содержания элемента в золе к его содержанию в сухом веществе (синоним – коэффициент обогащения). Степень концентрирования / улетучивания элементов в процессе сжигания / озоления во всех исследуемых случаях различная. Кроме того, для большинства элементов не наблюдается зависимости этого показателя от зольности исследуемого материала.

Исключение составляют Ba, Th, Sn, Sb, Zn, Se (коэффициент парной корреляции $-0,97$, $-0,97$, $-0,95$, $-0,83$, $-0,69$, $-0,67$ соответственно), а также As, P, Mg, Ca (коэффициент парной корреляции $0,77$, $0,73$, $0,67$, $0,55$), для которых установлены достоверные ($p = 0,01$, $p = 0,05$ для Zn, Se, As, P, Mg, $p > 0,05$ для Ca) отрицательные и положительные связи между зольностью кости и степенью концентрирования элемента. В литературе также описывается наличие корреляционных связей между содержанием P, As, в меньшей степени Sn и Zn в биомассе и зольностью материала; отмечается также корреляционная зависимость между содержанием Sn, Th, Ba в золе биомассы и концентрацией Ca, Mg и O (Vassilev et al., 2014).

Таким образом, существует вероятно, тесная связь вышеуказанных элементов с гидроксилапатитом или другим фосфатами, составляющим костную ткань.

Для ряда элементов наблюдается относительное постоянство степени концентрирования в исследуемых экспериментальных случаях: Na, Mg, P, Ca, Mn, Co, Zn и Ga (коэффициент вариации не превышает 20%). С одной стороны, это может быть связано с низкой изменчивостью показателя зольности кости (коэффициент вариации 27%), который составлял 50–59%, за исключением случая исследования губчатого вещества костной ткани, где отмечена зольность 19%. С другой стороны, такое поведение элементов, вероятно, указывает на некоторое постоянство степени концентрирования вышеуказанных элементов при озолении костной ткани.

При рассмотрении графиков зависимостей содержания элементов в сухом и озолённом веществе костной ткани выделяется группа, в поведении которой наблюдается некоторая зависимость. Отмечено, что поведение данных элементов при озолении костной ткани поддается описанию различными функциями с величиной достоверности аппроксимации 85–99%. Установлено, что линейная зависимость характерна для Fe, Mg, Zn, Cr, Mn, As, Pr и W (рис. 3); логарифмическая – для Zr и Cd, а поведение Ca, P, Sb, Ga, Nb, Pb и U – описывается полиномиальной функцией 2-го порядка (табл. 2).

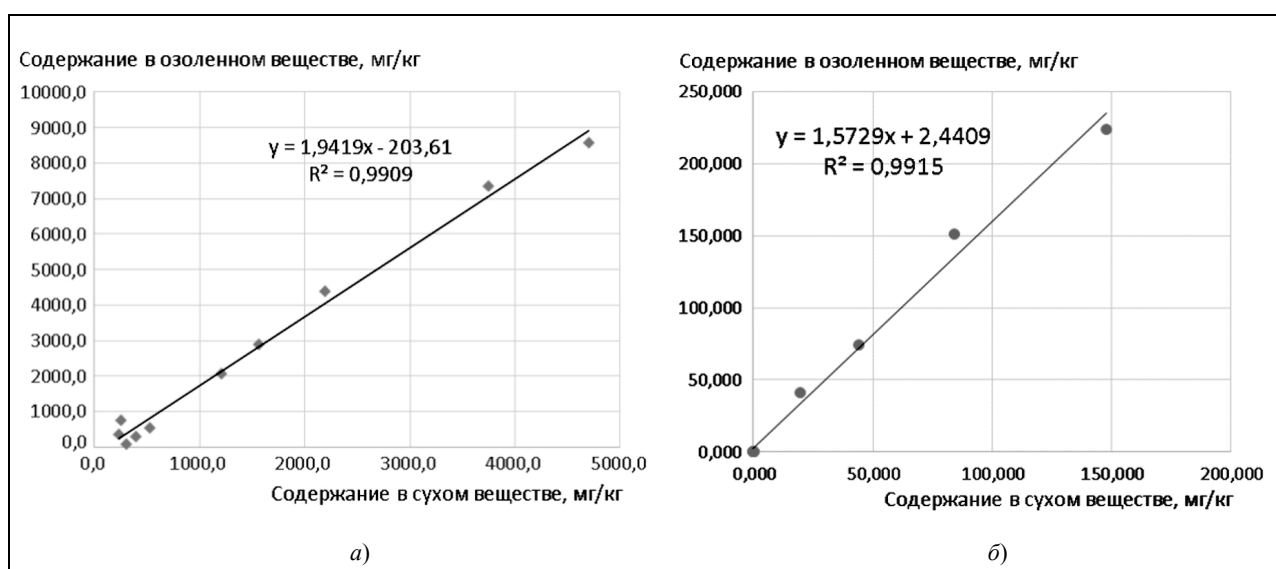


Рис. 3. Зависимость содержания в золе кости от содержания в сухом веществе:

а – железа; б – мышьяка

Таблица 2. Некоторые функции зависимостей содержания элементов в озолённом веществе от содержания в сухом веществе

Элемент	Название функции	Формула	Величина аппроксимации, %
Fe	Линейная	$Y=1,9 \cdot X-203,6$	99
Zn		$Y=1,6 \cdot X-30,0$	99
As		$Y=1,6 \cdot X+2,44$	99
Pr		$Y=1,2 \cdot X+0,002$	96
U		$Y=1,22 \cdot X+0,005$	93
Mn		$Y=1,2 \cdot X-0,46$	91
Mg		$Y=1,5 \cdot X-218,5$	91
Cr		$Y=1,4 \cdot X+27,4$	90
Dy		$Y=1,0 \cdot X+0,0001$	90
W		$Y=1,4 \cdot X-0,01$	87
Cd		Логарифмическая	$Y=0,45 \ln(x)+1,8$
Zr	$Y=0,37 \ln(x)+1,21$		91
P	Полиномиальная	$Y=-4E-05 \cdot X^2+10,04 \cdot X-415268$	98
Ca		$Y=-1E-05 \cdot X^2+7,14 \cdot X-568801$	93
Nb		$Y=11,13 \cdot X^2+0,10 \cdot X-0,02$	92
Sb		$Y=6,15 \cdot X^2-1,50 \cdot X+0,15$	90
Ga		$Y=-0,8 \cdot X^2+2,19 \cdot X-0,14$	90
Pb		$Y=-0,01 \cdot X^2+0,78 \cdot X+2,21$	86

П р и м е ч а н и е : X – содержание элемента в сухом веществе костной ткани; Y – содержание элемента в золе костной ткани.

ВЫВОДЫ

Элементный состав озолённого вещества в целом отражает состав сухой костной ткани. Однако концентрации большинства элементов в золе костной ткани выше, чем в сухом веществе кости (Li, Na, Mg, P, Ca, Ti, Cu, Zn, Ga, U, Al, Sc, Cr, Mn, Fe, As, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, La, Ce, Pr, Sm, Gd, Au, W, Bi), исключением из этого списка являются бром, ртуть и олово, которые улетучиваются в процессе сжигания. Для ряда элементов (K, V, Co, Ni, Ge, Se, Rb, Sr, Ru, Ag, In, Cs, Ba, Nd, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Re, Tl, Pb и Th) оказалось невозможным установить тенденцию их поведения, в том числе из-за низкой чувствительности использованного метода и чрезвычайно малой концентрации элемента в сухом и озолённом веществе.

Не установлено прямой зависимости между степенью концентрирования/улетучивания большинства элементов и зольностью вещества (за исключением Ba, Th, Sn, Sb, Zn, Se, а также As, P, Mg, Ca, для которых установлены отрицательные и положительные связи соответственно). Значи-

мыми факторами, определяющими тенденцию поведения элементов, вероятно, являются формы нахождения элементов в костной ткани, что подтверждается не только наличием корреляционных связей, но и весьма схожим поведением основных составляющих гидроксилпатита (Ca, P, Mg) при сгорании костной ткани.

Для некоторых элементов обнаружено постоянство величины концентрирования в процессе сжигания костной ткани (Na, Mg, P, Ca, Mn, Co, Zn и Ga). Для ряда других элементов (Fe, Mg, Zn, As, Pr, Ce, W, Zr, Cd, Cr, Sb, Mn, Ga, Nb, Pb и U) зависимость их содержания в золе костной ткани от содержания в сухом веществе поддается описанию с помощью различных функций. Таким образом, имеется перспектива пересчета концентраций элементов в золе костной ткани на сухое вещество.

Сгорание костной ткани – сложный процесс, который приводит к концентрированию и улетучиванию элементов. Исследование показывает, что такие очевидные факторы, как зольность, температура плавления и кипения элементов и

многие другие характеристики позволяют интерпретировать полученные результаты только в малой степени. Их объяснение, скорее всего, кроется в комбинации различных, в том числе малоизученных факторов, среди которых основное место занимает форма нахождения элемента в данной системе. Под данным термином понимается характер его вхождения в костную ткань, это может быть вхождение элемента в кристаллическую решетку гидроксилпатита (например, Са, Р), в виде изоморфного замещения (Ва, Sr), включения и т.д. Кроме того, значимыми факторами, влияющими на поведение элементов в процессе сгорания костной ткани, также могут быть температура её озоления, тип исследуемой ткани и многое другое.

ЛИТЕРАТУРА

Афтанас Л.И. и др. Элементный статус населения России. Ч. 1: Общие вопросы и современные методические подходы к оценке элементного статуса индивидуума и популяции. Под ред. А.В. Скального, М.В. Киселева. СПб: Медкнига «ЭЛБИ-СПб». 2010. 414 с.

Герк С.А., Голованова О.А. Элементный состав костной ткани человека в норме и при патологии. Вестник Омского университета. 2015; 4:39–44.

Дериглазова М.А. Рихванов Л.П. Особенности микро-минерального состава зольного остатка организма человека г. Норильск. Вестник Кольского научного центра РАН. 2017; 4(9):44–50.

Зайдель А.Н., Калитеевский Н.И., Липис Л.В., Чайка М.П. Эмиссионный спектральный анализ атомных материалов. Л.-М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1960. 670 с.

Игнатова Т.Н. Элементный состав организма человека и его связь с факторами среды обитания: Автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск. 2010. 228 с.

Кораго А.А. Введение в биоминералогия. СПб.: Недра. 1992. 280 с.

Крымова Т.Г., Колкутин В.В. Применимость элементного состава костной и зубной ткани для диагностики признаков человека. Судебно-медицинская экспертиза. 2007; 50(6):19–24.

Крымова Т.Г., Колкутин В.В., Добровольская М.В. Диагностика природных условий проживания на основании

результатов содержания различных химических элементов в костной ткани человека. Проблемы экспертизы в медицине. 2007; 2:37–40.

Ламанова Л.М. Тканевая кальцификация в сердечно-сосудистой системе. Вестник Томского государственного университета. 2010; 337:194–197.

Ньюман У.Ф., Ньюман М. Минеральный обмен кости. М.: Изд-во иностр. лит. 1961. 270 с.

Рихванов Л.П., Дериглазова М.А., Барановская Н.В. Минералого-геохимический состав зольного остатка организма человека г. Норильска как возможный индикатор элементного состава среды обитания. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017; 328(9):67–81.

Русанов А.К. Спектральный анализ руд и минералов. М.-Л: Госгеолыздат. 1948. 150 с.

Скальный А.А. и др. Сравнительный анализ информативности диагностических биосубстратов (сыворотка крови, шерсть) при определении элементного статуса экспериментальных животных. Микроэлементы в медицине. 2016; 17(1):38–44.

Скальный А.В. Оценка и коррекция элементного статуса населения – перспективное направление отечественного здравоохранения и экологического мониторинга. Микроэлементы в медицине. 2018; 19(1):5–13.

Сокол Э.В. и др. Микроэлементный состав нефролитов как маркер воздействия окружающей среды на человека. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2007; 2:151–163.

Сокол Э.В. Металлические частицы в почечных камнях как индикатор профессиональной деятельности пациентов. Минералогия техногенеза. 2004; 105–115.

Тёрек Т., Мика Й., Гегуш Э Эмиссионный спектральный анализ в 2 частях. Ч. 1. М.: Мир. 1982. 280 с.

Betts F., Blumenthal N.C., Posner A.S. Bone mineralization Journal of Crystal Growth. 1981; 53:63–73.

Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. Fuel. 2013; 105:40–76.

Vassilev S.V., Baxter D., Vassileva C.G An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter Fuel. 2013; 112:391–449.

Vassilev S.V., Vassileva C.G., Baxter D. Trace element concentrations and associations in some biomass ashes. Fuel. 2014; 129:292–313.

BEHAVIOR OF ELEMENTS DURING HIGH-TEMPERATURE BONE COMBUSTION

M.A. Deriglazova, L.P. Rikhvanov

National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina str. 30, Tomsk, 634034, Russia

ABSTRACT. The number of studies of ashed biosubstrates in terms of elemental composition is sharply increasing due to the growing interest of living matter. Thus, it is extremely important to know, is the composition of the ashed mate-

rial reflects the composition of the original object and how elements behave during the process of combustion. To answer these questions, an experiment on the samples of biological material was made. The purpose of the study is to analyze the behavior of elements in the process of high-temperature combustion of bone tissue. During the experiment, the following methods of analysis were used: instrumental neutron activation and mass spectrometry with inductively coupled plasma. The study shows that most of the elements are concentrated in bone ash during combustion (Li, Na, Mg, P, Ca, Ti, Cu, Zn, Ga, U, Al, Sc, Cr, Mn, Fe, As, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, La, Ce, Pr, Sm, Gd, Au, W, Bi), while volatilization is observed only for Br, Hg and Sn. The exclusive role of the chemical compound of the element is shown for the analysis of its behavior. The experiment also shows the role of combustion temperature to predict the behavior of element: it was found that lower temperature of ashing (500 °C) leads to more intensive volatilization of elements. In addition, an algorithm is proposed to convert the content of the element in ash of the bone to dry matter. At the same time, the dependence of the content of elements in the ash on their content in dry tissue were established using mathematical functions with high accuracy of approximation (for Fe, Mg, Zn, As, Pr, Ce, W, Zr, Cd, Cr, Sb, Mn, Ga, Nb, Pb, and U).

KEYWORDS: behavior of elements, ash, bone tissue, combustion.

REFERENCES

- Aftanas L.I. i dr. Elementnyj status naseleniya Rossii. Ch. 1: Obshchie voprosy i sovremennye metodicheskie podhody k ocenke elementnogo statusa individuumov i populyacii. Pod red. A.V. Skal'nogo, M.V. Kiseleva. SPb: Medkniga «ELBI-SPb». 2010. 414 s.
- Gerik S.A., Golovanova O.A. Elementnyj sostav kostnoj tkani cheloveka v norme i pri patologii. Vestnik Omskogo universiteta. 2015; 4:39–44.
- Deriglazova M.A. Rihvanov L.P. Osobennosti mikromineral'nogo sostava zol'nogo ostatka organizma cheloveka g. Noril'sk. Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN. 2017; 4(9):44–50.
- Zajdel' A.N., Kaliteevskij N.I., Lipis L.V., Chajka M.P. Emissionnyj spektral'nyj analiz atomnyh materialov. L.-M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury. 1960. 670 s.
- Ignatova T.N. Elementnyj sostav organizma cheloveka i ego svyaz' s faktorami sredy obitaniya: Avtoref. diss. ... kand. geol.-mineral. nauk. Tomsk. 2010. 228 s.
- Korago A.A. Vvedenie v biomineralogiyu. SPb.: Nedra. 1992. 280 s.
- Krymova T.G., Kolkutin V.V. Primenimost' elementnogo sostava kostnoj i zubnoj tkani dlya diagnostiki priznakov cheloveka. Sudebno-medicinskaya ekspertiza. 2007; 50(6):19–24.
- Krymova T.G., Kolkutin V.V., Dobrovolskaya M.V. Diagnostika prirodnyh uslovij prozhivaniya na osnovanii rezul'tatov sodержaniya razlichnyh himicheskikh elementov v kostnoj tkani cheloveka. Problemy ekspertizy v medicine. 2007; 2:37–40.
- Lamanova L.M. Tkanevaya kal'cifikaciya v serdechno-sosudistoj sisteme. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010; 337:194–197.
- N'yuman U.F., N'yuman M. Mineral'nyj obmen kosti. M.: Izd-vo inostr. lit. 1961. 270 s.
- Rihvanov L.P., Deriglazova M.A., Baranovskaya N.V. Mineralogo-geohimicheskij sostav zol'nogo ostatka organizma cheloveka g. Noril'ska kak vozmozhnyj indikator elementnogo sostava sredy obitaniya. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2017; 328(9):67–81.
- Rusanov A.K. Spektral'nyj analiz rud i mineralov. M-L: Gosgeolizdat. 1948. 150 s.
- Skal'nyj A.A. i dr. Sravnitel'nyj analiz informativnosti diagnosticheskikh biosubstratov (syvorotka krovi, sherst') pri opredelenii elementnogo statusa eksperimental'nyh zhivotnyh. Mikroelementy v medicine. 2016; 17(1):38–44.
- Skal'nyj A.V. Ocenka i korrekciya elementnogo statusa naseleniya – perspektivnoe napravlenie otechestvennogo zdruvoohraneniya i ekologicheskogo monitoringa. Mikroelementy v medicine. 2018; 19(1):5–13.
- Sokol E.V. i dr. Mikroelementnyj sostav nefrolitov kak marker vozdeystviya okruzhayushchej sredy na cheloveka. Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 2007; 2:151–163.
- Sokol E.V. Metallicheskie chasticy v pochechnyh kamnyah kak indikator professional'noj deyatel'nosti pacientov. Mineralogiya tekhnogeneza. 2004; 105–115.
- Терек Т., Мика Й., Гегуш Э Эмиссионный спектральный анализ в 2 частях. Ч. 1. М.: Мир. 1982. 280 с.
- Betts F., Blumenthal N.C., Posner A.S. Bone mineralization Journal of Crystal Growth. 1981; 53:63–73.
- Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. Fuel. 2013; 105:40–76.
- Vassilev S.V., Baxter D., Vassileva C.G An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter Fuel. 2013; 112:391–449.
- Vassilev S.V., Vassileva C.G., Baxter D. Trace element concentrations and associations in some biomass ashes. Fuel. 2014; 129:292–313.