

УДК 571.471.3

**Горлова Е.Н., Крылович О.А., Тиунов А.В., Хасанов Б.Ф.,
Васюков Д.Д., Савинецкий А.Б.**

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

Ленинский пр., 33, Москва, 119071, Россия

E-mail: gorlova.k@gmail.com

okrylovich@gmail.com

a_tiuinov@mail.ru

bulatfk@gmail.com

tipa2128506@gmail.com

arkadybs@rambler.ru

ИЗОТОПНЫЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОД ТАКСОНОМИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ АРХЕОЗООЛОГИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА*

В статье обсуждаются возможности использования изотопного состава углерода (соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) и азота (соотношение $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) для таксономической диагностики костных остатков животных из археологических памятников и других древних отложений. Представлен обзор мировой литературы, раскрываются особенности изотопного анализа с точки зрения изучения экологии позвоночных животных и методологические трудности работы с ископаемым материалом. Приводятся также конкретные примеры успешного применения изотопного анализа для видовой идентификации археозоологических остатков, в частности, костей бурого и белого медведей, крупных морских млекопитающих и нескольких видов гусеобразных.

Ключевые слова: стабильные изотопы, кости животных, таксономическая диагностика, археозоология, Ursus, Hydrodamalis gigas.

DOI: 10.17746/1563-0102.2015.43.1.110–121

Введение

Археозоологическим материалом называют субфоссильные остатки животных, живших в последние тысячелетия [Reitz, 2008]. В обычных условиях этими остатками чаще всего являются элементы внутреннего и внешнего скелета позвоночных и беспозвоночных животных. Они сохраняются в составе естес-

венных отложений (в скальных нишах, береговых наносах, мерзлотных толщах, гудроновых озерах, норах млекопитающих и т.д.), но наиболее массовые и многочисленные захоронения фауны прошлого встречаются в культурных слоях археологических памятников [Динесман, 1979; Антипина, 2003; Reitz, Wing, 2008].

Изучение костных остатков археофауны важно по многим причинам. При воссоздании истории экосистем археозоологический анализ позволяет получить информацию о видовом составе, численности, пространственном распределении, возрастной и половой структуре отдельных видов, живших в прошлом, а также динамике этих показателей во времени. При реконструкции истории человеческих обществ изучение остатков животных помогает выявить особен-

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№15-04-09024, 15-04-07969, 15-04-04721, 14-04-01824) и программ Президиума РАН и ОБН «Живая природа: современное состояние и проблемы», «Происхождение биосферы и эволюция геобиологических систем» и «Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий».

ности экономики, торговых связей, основные стратегии прожиточного минимума, установить характер эксплуатации популяций животных, его формы, назначение, сезонность и т.д. Кроме того, важнейшей задачей, объединяющей оба этих направления исследований, является определение степени взаимного влияния популяций животных, человека и окружающей среды.

Для достижения вышеперечисленных целей необходима точная таксономическая диагностика изучаемого археозоологического материала. Определение остатков животных производится, как правило, на базе эталонных сравнительных коллекций скелетов современных животных с четкой видовой принадлежностью, известным полом, возрастом, местом сбора и т.д. Дополнительно привлекаются справочная литература, определители [Громова, 1950; 1960; Gilbert, Martin, Savage, 1985; Hillson, 1986; Gilbert, 1993; и др.] и электронные ресурсы с трехмерными изображениями скелетных элементов (например, <http://bones.iri.isu.edu>). Однако нередко определение по внешним морфологическим признакам до вида невозможно. В таких случаях чаще всего приходится ограничиваться определением до семейства/отряда/класса или прибегать к генетическому анализу ископаемого материала.

В данной статье рассматривается возможность использования изотопного анализа для идентификации видов животных, сходных по строению скелета, но сильно различающихся по экологии питания.

Общие принципы изотопного анализа

Многие биогенные элементы представлены несколькими стабильными, т.е. не подверженными радиоактивному распаду, изотопами (^1H и ^2H , ^{12}C и ^{13}C , ^{14}N и ^{15}N и т.д.). Различия в соотношении легкого и тяжелого изотопов в разных экологических средах, между видами или в разных тканях формируются в результате целого ряда физико-химических процессов. Связано это преимущественно с тем, что молекулы разной массы (например, $^{13}\text{CO}_2$ и $^{12}\text{CO}_2$) различаются по активности и силе внутренних связей и с разной вероятностью принимают участие в химических реакциях и фазовых переходах [Koch, 2007; Sulzman, 2007]. Изотопный состав элемента обычно измеряют в относительных единицах (δ), которые отражают отличия изотопного состава элемента в исследуемом веществе от международного стандарта. Поскольку изменения изотопного состава невелики, величину δ принято умножать на 1000 и выражать в промилле (‰).

В экологических исследованиях чаще всего используют изотопный состав азота (соотношение

$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) и углерода (соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$). Изотопный анализ широко применяется в экологии, однако в данной работе мы ограничимся рассмотрением его использования при изучении экологии питания животных и определении их трофических связей. Изотопный состав элементов в тканях консументов в целом соответствует изотопному составу потребляемой ими пищи [DeNiro, Epstein, 1978; 1981]. Однако в процессе перехода с одного трофического уровня на другой происходит небольшое изменение изотопного состава. Величина, на которую изменяется изотопный состав ($\Delta^{13}\text{C}$ или $\Delta^{15}\text{N}$), определяется как разница между изотопным составом тканей животного и изотопным составом его пищи ($\delta_{\text{консумента}} - \delta_{\text{диеты}}$) и называется трофическим фракционированием или коэффициентом трофической дискриминации [Martínez del Río et al., 2009; Bond, Hobson, 2012]. Таким образом, изотопный состав азота и углерода тканей животного зависит от его положения в трофической цепи и от изотопного состава первичных продуцентов, находящихся в основании пищевой пирамиды в данной экосистеме.

Различиями в величинах $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ первичных продуцентов определяются различия между всеми последующими консументами в разных пищевых цепях. Изменчивость изотопного состава продуцентов связана со способами фиксации биогенных элементов, с физическими и климатическими условиями среды, в которой этот процесс происходит, а также с региональной изменчивостью изотопного состава самих биогенных ресурсов [Heaton, 1999; Marshall, Brooks, Lajtha, 2007]. Поэтому в изотопном составе тканей животного помимо информации о его трофическом положении потенциально заложена информация об особенностях местообитаний, в которых оно питалось.

Углерод. Значительные различия $\delta^{13}\text{C}$ тканей животных (от -28 до -6 ‰) связаны главным образом с сильной изменчивостью $\delta^{13}\text{C}$ первичных продуцентов, находящихся в основании пищевых цепей [Kelly, 2000; Koch, 2007]. Определяется эта вариабельность особенностями фиксации CO_2 разными типами растений в разных средах.

Все растения в процессе фотосинтеза дискриминируют ^{13}C в пользу ^{12}C , поэтому их ткани обеднены ^{13}C по сравнению с углеродом CO_2 атмосферного воздуха. Степень дискриминации различается у растений, использующих разные пути фотосинтеза [Park, Epstein, 1960; O'Leary, 1988]. Дискриминация против ^{13}C наиболее сильно выражена у растений с циклом Кальвина (C3-растения: большинство наземных и водных продуцентов) и наименее сильно – у растений с циклом Хэтча-Слейка (C4-растения: некоторые злаки, осоки и представители других групп покрытосеменных растений, в основном из южных аридных

местообитаний). Отбор изотопов углерода происходит как на стадии ферментативного карбоксилирования, так и в процессе устьичного дыхания. [Heaton, 1999; Marshall, Brooks, Lajtha, 2007].

Величина $\delta^{13}\text{C}$ C3-растений в среднем составляет -27‰ (от -35 до -21‰), а C4-растений равняется -13‰ (от -14 до -10‰) [Craig, 1953; Ehleringer, Rundel, 1989; Kelly, 2000; Marshall, Brooks, Lajtha, 2007].

Водные растения, как правило, имеют C3 тип фотосинтеза, однако по изотопному составу они обычно обогащены ^{13}C по сравнению с наземными. В среднем значение $\delta^{13}\text{C}$ фитопланктона равно -22‰ , бентосной растительности -18‰ , а общий разброс значений $\delta^{13}\text{C}$ морских и пресноводных продуцентов очень широк: от -32 до -4‰ [Dienes, 1980; Keeley, Sandquist, 1992; France, 1995; Kelly, 2000]. Различия между морскими и наземными C3-растениями объясняются в первую очередь тем, что скорость диффузии углекислого газа в воде примерно в 10 000 раз меньше, чем в воздухе. Поэтому концентрация CO_2 в прилегающем к фотосинтезирующему растению слое воды быстро уменьшается. В силу этого снижается избирательность карбоксилирующего фермента и падают темпы направленного отбора $^{12}\text{CO}_2$ [O'Leary, 1988; Kelly, 2000]. Сходные процессы обеспечивают и высокую региональную изменчивость $\delta^{13}\text{C}$ растительности в океаническом бассейне. В районах с высокой плотностью растительного покрова или высокой продуктивностью (прибрежные или мелководные заросли макрофитов, подледные леса или апвеллинговые зоны) концентрация $^{13}\text{CO}_2$, растворенного в воде, резко увеличивается, по сравнению с менее продуктивными районами, что приводит к повышению значения $\delta^{13}\text{C}$ фитопланктона или водорослей [France, 1995; Schell, Barnett, Vinette, 1998; McRoy et al., 2004; Newsome, Clementz, Koch, 2010]. Кроме того, высокая вариабельность величины $\delta^{13}\text{C}$ морских продуцентов может объясняться различиями в степени использования растворенного в воде бикарбоната, который обогащен ^{13}C по сравнению с углекислым газом [Kelly, 2000; Szpack et al., 2012]. Размеры и вид водной растительности также влияют на изотопный состав углерода [Goericke, Fry, 1994].

Степень трофической дискриминации изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ невелика. В среднем значение $\Delta^{13}\text{C}$ небольшое ($0,5\text{--}2,0\text{‰}$) и подвержено значительным колебаниям на разных трофических уровнях [Peterson, Fry, 1987; Kelly, 2000; Post, 2002]. Для многих морских сообществ показано, что трофическое обогащение ^{13}C происходит только в начале пищевой цепи, тогда как $\delta^{13}\text{C}$ консументов второго, третьего порядков и выше соответствует значениям $\delta^{13}\text{C}$ их диеты [Rau et al., 1983; Wada et al., 1987; Hobson, Welch, 1992; Dehn, 2005]. Поэтому соотношение стабиль-

ных изотопов углерода в тканях обычно не используется для определения трофического уровня животного. Напротив, благодаря слабому изменению изотопного сигнала при продвижении по пищевой цепи, величина $\delta^{13}\text{C}$ тканей животных хорошо отражает усредненный изотопный состав его жертв и первичных продуцентов.

Азот. Изменчивость значений $\delta^{15}\text{N}$ позвоночных животных заключена в интервале от -5 до $+25\text{‰}$ [Kelly, 2000; Koch, 2007] и зависит как от их положения в цепи питания, так и от изотопного состава азота первичных продуцентов. Значения $\delta^{15}\text{N}$ растений определяются в первую очередь доступностью и концентрацией ресурсов азота в окружающей среде и их изотопным составом [Marshall, Brooks, Lajtha, 2007]. Тип почвы, режим увлажнения, глубина корневой системы, наличие или отсутствие микоризы – все эти факторы оказывают большое влияние на величину $\delta^{15}\text{N}$ продуцентов [Hedges, Stevens, Koch, 2006].

Значения $\delta^{15}\text{N}$ тканей большинства наземных растений варьируют в пределах от -8 до $+18\text{‰}$ [Kelly, 2000]. Поскольку величина $\delta^{15}\text{N}$ атмосферного азота принята за 0, среднее значение $\delta^{15}\text{N}$ тканей азотфиксирующих растений обычно колеблется в более узких пределах (от -7 до $+7\text{‰}$). Морской фитопланктон, как правило, содержит больше ^{15}N по сравнению с наземными продуцентами ввиду более высоких значений $\delta^{15}\text{N}$ растворенных нитратов [Sigman, Kash, Casciotti, 2009]. В среднем его значение $\delta^{15}\text{N}$ составляет $+7\text{‰}$ (от $+1$ до $+16\text{‰}$), за исключением районов океана с преобладанием азотфиксирующих продуцентов [Kelly, 2000].

Величина $\delta^{15}\text{N}$ в тканях животных увеличивается в среднем на $2\text{--}5\text{‰}$ с каждым трофическим уровнем [Minagawa, Wada, 1984; Hobson, Welch, 1992; Post, 2002]. Механизм трофического фракционирования изотопов азота у животных связан с образованием продуктов выделения. Аминогруппы, содержащие легкие атомы ^{14}N , активнее участвуют в реакциях аминирования и дезаминирования и несколько быстрее выводятся из организма при формировании продуктов азотного обмена. Таким образом, продукты выделения животных обеднены ^{15}N , по сравнению с тканями тела, которые, напротив, обогащены ^{15}N , по сравнению с диетой [Minagawa, Wada, 1984; Fogel et al., 1997; Balter et al., 2006].

Благодаря трофическому фракционированию, величина $\delta^{15}\text{N}$ может служить показателем положения животного в трофической цепи или его трофического уровня. Так, ткани хищников более обогащены ^{15}N , по сравнению с тканями травоядных [Bocherens et al., 1997; Kelly, 2000], а ткани высших консументов длинных трофических цепей обогащены, по сравнению с тканями высших консументов коротких трофических цепей [Chamberlain et al., 2005; Dehn, 2005].

Конкретная величина $\Delta^{15}\text{N}$ может колебаться в довольно широких пределах, в зависимости от таких факторов, как пол, класс, качество диеты, репродуктивный статус, стадия роста. Азот поступает в организм животного преимущественно из белков, поэтому количество белка в рационе может также влиять на интенсивность фракционирования изотопов азота [Pearson et al., 2003; Robbins, Felicetti, Sponheimer, 2005].

Ввиду особенностей выделительной системы разных групп позвоночных значения коэффициента трофической дискриминации для них могут различаться. Так, у птиц в отличие от млекопитающих основным продуктом выделения является не мочевина, а мочевая кислота, которой соответствует меньшая величина $\Delta^{15}\text{N}$ [Mizutani, Kabaya, Wada, 1991; Hobson, 1993].

Физиологическое состояние животных также может влиять на величину $\Delta^{15}\text{N}$. Например, при длительном голодании начинают расходоваться собственные резервы организма, что обуславливает рост содержания ^{15}N [Hedges, Stevens, Richards, 2006; Newsome, Clementz, Koch, 2010]. У самок млекопитающих в период лактации и беременности наблюдается снижение значений $\delta^{15}\text{N}$ быстровозобновимых тканей тела. Детеныши, питающиеся молоком матери, наоборот, обогащены ^{15}N по сравнению со взрослыми, т.к. фактически стоят на один трофический уровень выше [Hobson, Sease, 1998; Newsome et al., 2006; Горлова и др., 2012]. Таким образом, при использовании $\delta^{15}\text{N}$ в качестве инструмента для оценки трофического положения животного следует учитывать целый ряд факторов и стараться использовать как можно более однородную выборку, в т.ч. по возрасту особей.

Особенности изотопного состава коллагена костей. Трофическое фракционирование, сохранность изотопного сигнала и специфика получаемой информации о питании в большой степени зависят от типа изучаемой ткани. Кость состоит из кристаллов биоапатита, встроенных в органический матрикс, главным образом в структурированный белок коллаген [Fratzl, 2008]. В изотопных исследованиях используют и минеральную, и органическую составляющие кости, однако для реконструкции диеты животных чаще всего измеряют изотопный состав коллагена [Hedges, Stevens, Koch, 2006].

Коллаген кости обладает относительно стабильной структурой и может оставаться в неизменном виде длительное время. В умеренном климате изотопный сигнал коллагена костей сохраняется в течение 30–50 тыс. лет [Hedges, Stevens, Richards, 2006], а в условиях хорошей сохранности – 1 млн лет и более [Koch, 2007]. Это делает возможным изучение экологии животных, живших в далеком прошлом [Bocherens et al., 1997; Stevens et al., 2008; Misarti et al., 2009]. Степень сохранности коллагена принято оценивать по его элементному составу. В норме моле-

кула коллагена, не подвергавшаяся диагенетическим изменениям, включает ок. 10 % азота (по массе), а атомарное соотношение C/N находится в интервале от 2,9 до 3,6 [DeNiro, 1985; Ambrose, 1990]. Отклонение от этих величин указывает на плохую сохранность коллагена.

Изотопный состав организма является отражением изотопного состава его пищи, усредненного за определенный интервал времени. Скорость обмена, т.е. время, за которое после перемены питания изменяется атомарный состав ткани, зависит от скорости ее возобновления [Kelly, 2000]. Быстровозобновимые ткани, такие как кровь и печень практически полностью обновляются в течение нескольких дней или недель [Tieszen et al., 1983; Hobson, Clark, 1992]. Обновление мышечной и костной ткани происходит значительно медленнее. Как показали лабораторные исследования, у птиц коллаген кости после смены диеты обновляется в пределах года [Hobson, Clark, 1992]. У млекопитающих скорости обмена в несколько раз ниже [Tieszen et al., 1983]. Наиболее быстро состав кости меняется в процессе интенсивного роста, но изменения продолжают, даже после наступления половой зрелости: происходят резорбция старой костной ткани (как биоапатита, так и коллагена) и отложение новой [Ромер, Парсонс, 1992]. Однако доля таких метаболических и репарационных изменений составляет всего 0,1–0,2 % в год [Hesslein, Hallard, Ramlal, 1993]. Соответственно, полное изменение состава коллагена кости в ответ на изменения изотопного состава пищи занимает от нескольких месяцев в период интенсивного роста до нескольких лет у медленно растущих или окончивших свой рост животных.

Отдельные аминокислоты в составе белков несколько отличаются по величине $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$. В силу этого особенности аминокислотного состава разных тканей влияют на их изотопный состав и на степень трофической дискриминации. Ввиду высокого содержания глицина коллаген, как правило, обогащен ^{13}C на 2–4 ‰ по сравнению с мышечными белками или кровью и примерно на 5 ‰ – по сравнению с углеродом диеты в целом [Hedges, Stevens, Koch, 2006]. При сопоставлении значений изотопного состава коллагена костей разных видов рекомендуют использовать коэффициенты трофической дискриминации 0–2 ‰ для углерода и 3–5 ‰ для азота [Bocherens, Drucker, 2003].

Изменения изотопного состава атмосферы во времени. Изотопный состав атмосферы существенно менялся на протяжении последних столетий и ранее. Доказано, что в последние 150 лет произошло антропогенное снижение $\delta^{13}\text{C}$ CO_2 , называемое также эффектом Зюсса [Keeling, Moor, Tans, 1979; Francey et al., 1999; Marshall, Brooks, Lajtha, 2007]. Сжигание ископаемого топлива и изменения в землепользовании в

индустриальный период привели к росту поступления в атмосферу обедненного ^{13}C углекислого газа, тогда как его концентрация возросла примерно на 30 %, что обеспечило снижение $\delta^{13}\text{C}$ атмосферного углекислого газа примерно на 1,5 ‰ [Francey et al., 1999; IPCC, 2001; Marshall, Brooks, Lajtha, 2007]. Изотопный состав углерода на всех уровнях трофической цепи отражает изотопный состав исходного ресурса, поэтому снижение $\delta^{13}\text{C}$ на протяжении последних 150 лет наблюдается в тканях растений [Feng, 1999; Bale et al., 2011; Yakir, 2011] и животных [Hirons, Schell, Finney, 2001; Bump et al., 2007; Newsome et al., 2007]. Существенное увеличение концентрации CO_2 в плейстоцене, после окончания последнего оледенения 12–15 тыс. л.н. [Idermühle et al., 1999], также вызвало снижение $\delta^{13}\text{C}$ на всех уровнях пищевой цепи [Bump et al., 2007]. Таким образом, при сравнении изотопного состава в разные периоды необходимо использовать поправку, учитывающую изменения $\delta^{13}\text{C}$ атмосферного углекислого газа во времени.

Материал и методы

В данном исследовании для изотопного анализа использованы кости современных и древних животных. Современные образцы были отобраны из скелетов 12 бурых медведей (*Ursus arctos*), 10 белых медведей (*U. maritimus*), 2 белолобых гусей (*Anser albifrons*), 1 гуменника (*A. fabalis*), 2 белых гусей (*A. caerulescens*), 4 гусей-белощеев (*A. canagica*) и 1 малой канадской казарки (*Branta hutchinsii*). Они взяты из сравнительной эталонной остеологической коллекции лаборатории биогеоэкологии и исторической экологии (ИПЭЭ РАН) им. В.Н. Сукачева и материалов полевых сборов.

Древние образцы получены в результате раскопок археологического памятника Канискак (побережье Берингова прол., Чукотка) и нескольких береговых отложений Командорско-Алеутской гряды. Из древнего поселения Канискак, формирование культурных слоев которого датируется 2500 ± 200 л.н., проанализировано 28 субфоссильных костных фрагментов представителей медвежьих. Из береговых отложений на Командорских и Алеутских о-вах получено 50 фрагментов костей морской коровы (*Hydrodamalis gigas*), из каждого был взят образец для изотопного анализа. Кости млекопитающих для изотопного анализа отбирались таким образом, чтобы исключить из рассмотрения остатки молодых животных, питавшихся или недавно переставших питаться молоком матери.

Из каждой кости были выделены образцы коллагена модифицированным методом, рекомендуемым для подготовки радиоуглеродных образцов [Longin, 1971; Jørgkov, Heinemeier, Lynnerup, 2007]. При по-

мощи электрического гравера с поверхности кости срезали верхний загрязненный слой, затем вырезали фрагмент компактной части кости весом примерно 0,2–0,5 г. Минеральную составляющую кости удаляли в 1М растворе соляной кислоты в течение 48 ч при температуре 2–4 °C, после чего образец тщательно отмыли от солей дистиллированной водой. Далее при температуре 90 °C в течение 24 ч коллаген растворяли в соляной кислоте (pH=2,5), высушивали в сушильном шкафу и измельчали. Современные образцы перед декальцинацией обезжиривали 10 %-м раствором бутанола [Nagai, Suzuki, 2000].

Навески сухого коллагена по 450–550 мкг упаковали в оловянные капсулы. Определение изотопного состава проводили на элементном анализаторе (Thermo Flash 1112) и изотопном масс-спектрометре Thermo DeltaV Plus в Центре коллективного пользования при ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН.

Изотопный состав азота и углерода выражали в тысячных долях отклонения от международного стандарта, δ , ‰:

$$\delta X = [(R_{\text{образца}} / R_{\text{стандарта}}) - 1] \times 1000,$$

где X – это ^{15}N или ^{13}C , а R – соответствующие соотношения $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ или $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Для азота в качестве международного стандарта был принят N_2 атмосферного воздуха, для углерода – «венский» эквивалент белемнита Pee Dee формации (VPDB). Оборудование было откалибровано относительно стандартных материалов, предоставленных МАГАТЭ (глутаминовая кислота USGS 40 ($\delta^{15}\text{N} = -4,5$ ‰; $\delta^{13}\text{C} = -26,4$ ‰), USGS 41 ($\delta^{15}\text{N} = +47,6$ ‰; $\delta^{13}\text{C} = +37,6$ ‰) и целлюлоза IAEA-CH₃ ($\delta^{13}\text{C} = -24,7$ ‰)). В качестве рабочего лабораторного стандарта использовали ацетанилид ($\delta^{15}\text{N} = -4,7$ ‰; $\delta^{13}\text{C} = -26,8$ ‰). Аналитическая погрешность измерения была в пределах $< 0,2$ ‰ для $\delta^{15}\text{N}$ и $< 0,15$ ‰ для $\delta^{13}\text{C}$.

Вместе с определением изотопного состава во всех пробах устанавливались общее содержание углерода и азота (% N, % C) и атомарное соотношение C/N, служащих индикаторами сохранности белка. Образцы коллагена, в которых общее содержание азота составляло менее 10 % или атомарное соотношение C/N не укладывалось в интервал 2,9–3,6, были исключены из рассмотрения [DeNiro, 1985; Ambrose, 1990].

При сравнении величин $\delta^{13}\text{C}$ современных и древних образцов была введена поправка на эффект Зюсса. Для современных животных из наземных экосистем мы использовали величину, равную изменению $\delta^{13}\text{C}$ атмосферного CO_2 в индустриальный период, что составило +1,5 ‰ [Francey et al., 1999; Yakir, 2011], для современных животных из морских экосистем – поправку +1,2 ‰, рассчитанную для северной части Тихого океана [Misarti et al., 2009].

Использование анализа стабильных изотопов для таксономической диагностики

Медвежьи в добыче древних зверобоев Чукотки.

В последние тысячелетия в прибрежных районах Чукотского п-ова была распространена культура морских зверобоев [Диков, 1979; Крупник, 1989; Бронштейн, Днепровский, 2001, 2012]. Остеологические спектры из культурных слоев древних поселений показывают, что основой жизнеобеспечения населения являлась охота на морских млекопитающих и птиц; тундровый промысел был второстепенным, но постоянным занятием [Динесман и др., 1996; Динесман, Савинецкий, 2003; Горлова, Васюков, 2013].

Помимо охоты на тюленей, моржей, китообразных, песца и северного оленя традиционным занятием в жизни берегового населения был промысел медвежьих [Арутюнов, Сергеев, 1975; Динесман и др., 1996]. В количественном отношении доля медведей в общей добыче была невелика (менее 1 % от всех млекопитающих) и не могла конкурировать с объемами промысла основных промысловых видов – тюленей и моржей. Однако кости медвежьих встречаются в культурных слоях разных периодов бытования зверобойной культуры, т.е. охота на медведей, по-видимому, была регулярным занятием аборигенного населения на протяжении тысячелетий.

Определяя остеологический материал из древних поселений зверобойной культуры, мы столкнулись с проблемой таксономической диагностики медвежьих. В современных экосистемах Чукотского п-ова обитает два вида медведей – бурый и белый. Из обнаруженных при раскопках древнего поселения Канискак (66°02' с.ш., 169°56' з.д.) 28 фрагментов костей медвежьих 5 ед. визуальным способом были определены как принадлежавшие белому медведю и 1 ед. – бурому. Остальные 22 фрагмента до вида определить не удалось, т.к. они представляли собой плохо определимые элементы скелета (преимущественно фаланги пальцев).

Для точной видовой диагностики костных остатков и выявления соотношения двух видов медведей в добыче древних охотников использовался изотопный анализ. Как уже отмечалось, содержание тяжелых изотопов азота и углерода в морских экосистемах значительно выше, чем в наземных [Kelly, 2000; Chamberlain et al., 2005; Dehn, 2005]. Белый медведь – морской хищник, основной добычей которого являются морские млекопитающие [Hobson, Welch, 1992]. Бурый медведь всеяден, но в его рационе, даже в примор-

ских экосистемах, преобладают наземные ресурсы [Барышников, 2007]. Изотопный состав тканей этих двух видов различается и поэтому служит хорошим индикатором видовой принадлежности.

Результаты изотопного анализа коллагена костей современных медвежьих из прибрежных экосистем Чукотского п-ова наглядно продемонстрировали различия в питании между видами (рис. 1). По изотопному сигналу белый медведь – высший консумент в морской трофической сети, тогда как изотопный состав бурого медведя отражает смешанное питание. Изотопный анализ субфоссильных образцов позволил с точностью установить, что все обнаруженные в культурном слое остатки медвежьих, в т.ч. образец, первоначально идентифицированный по морфологическим признакам как кость бурого медведя, принадлежали белому медведю.

Полное отсутствие остатков бурого медведя на поселении довольно неожиданно, поскольку в современных экосистемах Чукотки бурый медведь является видом, постоянно присутствующим в безледный период, тогда как белый медведь – лишь эпизодически [Туманов, 2003; Барышников, 2007]. Одной из причин, объясняющих отсутствие бурого медведя в остатках добычи древних морских зверобоев, может быть относительно недавнее изменение распространения этого хищника. Возможно, 2500±200 л.н. граница ареала бурого медведя проходила южнее и не включала приморские районы полуострова. Натуралисты братья Краузе, работавшие летом 1881 г. в

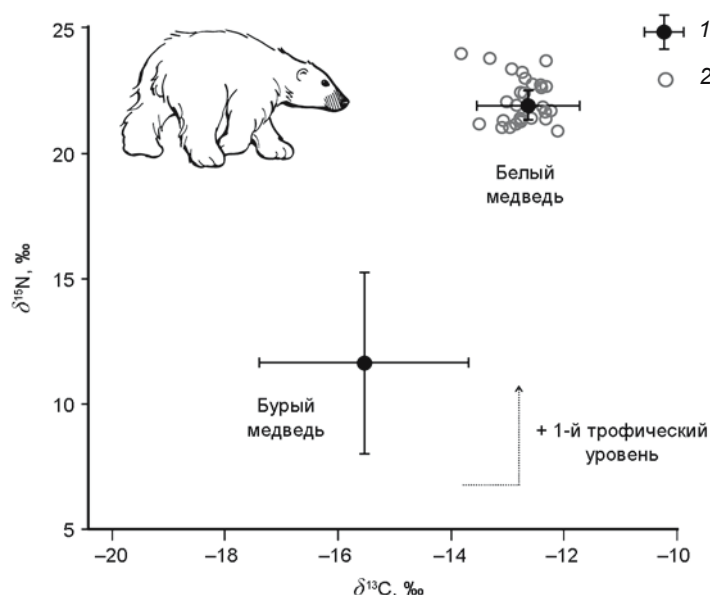


Рис. 1 Изотопный состав коллагена костей современных бурого (n = 12) и белого (n = 10) медведей Чукотки и медведей из древнего поселения Канискак (n = 28). Величины $\delta^{13}\text{C}$ современных животных скорректированы с учетом изменения состава атмосферы. 1 – современные (среднее $\pm$ стандартное отклонение); 2 – древние.

приморских районах Северо-Восточной Чукотки, в своих путевых заметках отмечали отсутствие бурого медведя [To the Chukchi peninsula..., 1993]. Сегодня бурый медведь в прибрежных районах полуострова встречается повсеместно.

Расширение ареала бурого медведя могло быть следствием культурно-экономических изменений в регионе. Широкое применение современным местным населением огнестрельного оружия и промышленные выловы морских млекопитающих обусловили увеличение отходов промысла. На протяжении тысячелетий традиционным оружием морского зверобоя был гарпун, который прочно закоривается в теле жертвы, не давая ей уйти от охотника. В XIX в. среди населения стало распространяться огнестрельное оружие. При охоте с ружьем или винтовкой вероятность того, что раненое животное уйдет от преследователя или утонет до того, как охотник успеет подплыть к нему на каяке, гораздо выше [Файнберг, 1991]. Бурых медведей могли привлечь береговые свалки, появившиеся в связи с возросшими объемами промысла, а также увеличившиеся выбросы раненых и погибших морских млекопитающих. По своему изотопному сигналу измеренные нами бурые медведи полуострова занимают промежуточное положение между морскими и наземными хищниками, что свидетельствует об активном питании морскими выбросами и не противоречит нашей гипотезе.

Определение остатков морской коровы. До середины XVIII в. на Командорских о-вах обитала ныне вымершая морская, или Стеллерова, корова. По описанию Георга Стеллера – первого и единственного натуралиста, видевшего этих животных живьем, – морские коровы были крупными морскими млекопитающими, по размерам превосходящими всех современных сиреновых. В длину они достигали более 7 м и весили несколько тонн. Это были медлительные животные, питавшиеся только морскими водорос-

лями в прибрежной зоне [Гептнер и др., 1967]. Считается, что причиной их полного исчезновения стал интенсивный промысел. Вид был открыт экспедицией Беринга в 1741 г. По приблизительным оценкам на тот момент командорская популяция насчитывала 1,5–2,0 тыс. особей. В последний раз коров видели на о-ве Медном в 1754 г., на о-ве Беринга – в 1768 г. [Там же]. Морская корова в голоцене обитала также на Алеутских о-вах, но время ее исчезновения неизвестно [Corbett et al., 2008]. Наиболее поздний образец морской коровы (один фрагмент ребра) был обнаружен в 1998 г. в ходе археологических раскопок на о-ве Кыска. Его радиоуглеродная дата 910 л.н.

Представители рода *Hydrodamalis* в плейстоцене были распространены от Калифорнии до Японии [Whitmore, Gard, 1977], но большое количество костей *H. gigas* голоценового времени встречается только в береговых отложениях на Командорских о-вах [Савинецкий, 1992], несколько фрагментов было найдено при археологических раскопках на Алеутских о-вах [Corbett et al., 2008]. Остеологические остатки морской коровы включают в основном фрагменты ребер, которые хорошо определяются по следам пахиостоза (сильное разрастание компактной части кости) [Гептнер и др., 1967]. Однако пахиостоз характерен и для некоторых китообразных, в связи с чем определение небольших фрагментов ребер плохой сохранности визуальным способом может быть ошибочным.

Применение изотопного анализа для идентификации костей морской коровы было предложено Д. Корбет с соавторами [Corbett et al., 2008]. Морская корова – единственное травоядное морское млекопитающее в этом районе и поэтому хорошо отличается от китообразных по изотопному составу коллагена (рис. 2). Гренландский (*Balaena mysticetus*), серый (*Eschrichtius robustus*) и синий (*Balaenoptera musculus*) киты, питающиеся зоопланктоном, а также хищные

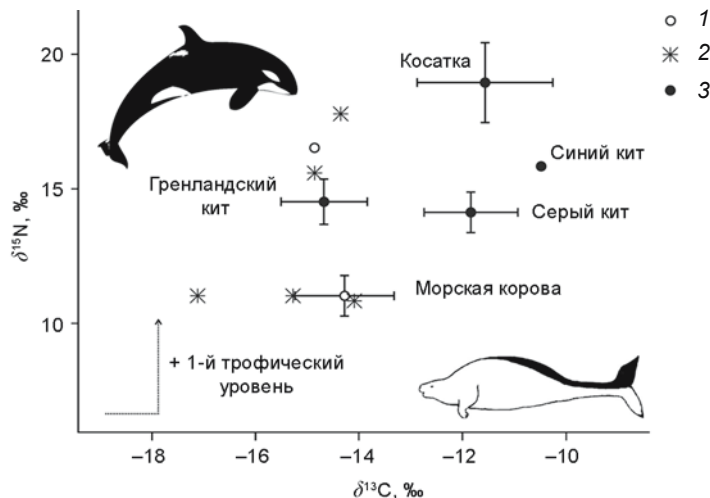


Рис. 2. Изотопный состав (среднее ± стандартное отклонение) коллагена костей из голоценовых отложений Командорско-Алеутской гряды: «морских коров» (n = 49 – наши данные (1), n=3 – по: [Corbett et al., 2008] (2) и современных китообразных Берингова моря (3): гренландский кит (n = 3) [Schoeninger, DeNiro, 1984], серый кит (n = 3) [Newsome et al., 2009], синий кит (n = 1) [Schoeninger, DeNiro, 1984], а также зубного дентина косатки (n > 200) [Newsome et al., 2009]. Значения δ¹³C современных животных скорректированы с учетом изменений состава атмосферы. Три образца, первоначально отнесенные к морской корове, принадлежали китообразным.

косатки (*Orca orca*) относятся к более высоким трофическим уровням, им соответствуют большие значения $\delta^{15}\text{N}$ [Schoeninger, DeNiro, 1984; Newsome et al., 2009].

В работе Корбет с соавторами [Corbett et al., 2008] приводятся данные измерений обнаруженных в голоценовых отложениях пяти ребер, которые были определены как принадлежавшие морской корове. На основании изотопного состава подтверждена видовая принадлежность только трех ребер; определения для двух ребер оказались ошибочными, ребра относились к другим видам морских млекопитающих, занимающим более высокий трофический уровень.

Нами измерен изотопный состав коллагена 50 фрагментов ребер из голоценовых отложений на Командорских и Алеутских о-вах; визуально они были определены как принадлежавшие морской корове. Было установлено, что 49 обломков принадлежали травоядному млекопитающему и хорошо отличались по изотопному составу от костей остальных морских животных региона. Только один фрагмент кости из материала с о-ва Булдырь не соответствовал диапазону, характерному для морской коровы и, видимо, относился к киту.

Определение костей гусиных. Изотопный анализ проводился только на современных образцах, однако он также продемонстрировал возможности таксономической идентификации на основании различий величин $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$.

При определении остатков авифауны с поселений древних жителей Берингоморья было невозможно разделить некоторые виды гусиных. Например, гусь-белошей и малая канадская казарка имеют большое сходство по морфологии костей. Однако эти два вида четко различаются по поведению и питанию. Если казарка, как большинство гусиных этого региона, в течение всего года предпочитает держаться тундровых районов, то белошей во время пролета и на зимовке кормится в основном в прибрежной зоне морской растительностью и беспозвоночными [Petersen, 1983; Eichholz, Sedinger, 2006; Hupp, Schmutz, Ely, 2008].

Изотопный состав коллагена костей этих птиц отражает различия в питании (рис. 3). В нашем распоряжении имелся, к сожалению, только один скелет малой канадской казарки, поэтому мы измерили изотопный состав некоторых других гусиных, которые, как и казарка, большую часть года придерживаются внутренних районов и питаются тундровой растительностью [Портенко, 1972]. Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ большинства гусеобразных соответствуют первичным консументам наземной трофической сети, тогда

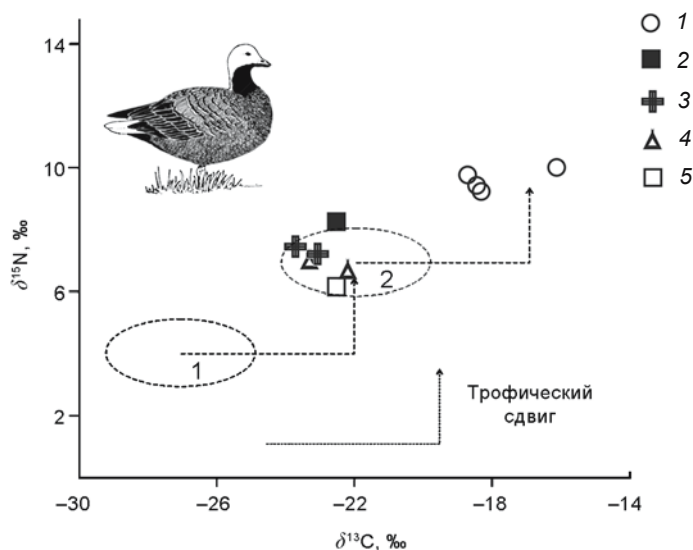


Рис. 3. Изотопный состав коллагена костей современных гусеобразных Берингоморского региона. Трофический сдвиг показывает значения $\Delta_{\text{диета-коллаген}}$ для птиц.

Примерные средние значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ растительности: 1 – наземной; 2 – морской.

1 – белошей; 2 – малая канадская казарка; 3 – белый гусь; 4 – белолобый гусь; 5 – гуменник.

как белошей отличаются от них и отвечают морским консументам. Эти различия могут быть использованы при определении костей гусеобразных из археологических памятников.

Заключение

Изотопный анализ может служить инструментом таксономической диагностики и быть доступной альтернативой палеогенетическому методу в тех случаях, когда рассматриваются виды, занимающие резко различные местообитания и/или имеющие большие различия в питании. Например, морские и наземные животные настолько хорошо отличаются от травоядных и хищных по изотопному составу, что эти различия не перекрывает внутривидовая вариабельность изотопного состава. Применение данного метода к видам, имеющим не столь радикальные различия в экологии, зависит от соотношения диапазона внутри- и межвидовой изменчивости, а также требует подробного исследования изотопного состава современных представителей видов.

Список литературы

Антипина Е.Е. Методические проблемы изучения остатков животных из археологических памятников // Новейшие археозоологические исследования в России: к столетию

со дня рождения В.И. Цалкина. – М.: Языки славян. культуры, 2003. – С. 7–33.

Арутюнов С.А., Сергеев Д.А. Проблемы этнической истории Берингоморья: (Эквенский могильник). – М.: Наука, 1975. – 240 с.

Барышников Г.Ф. Медвежьи (Carnivora, Ursidae). – СПб.: Наука, 2007. – 541 с. – (Фауна России и сопредельных стран. Нов. сер., № 147; т. 1: Млекопитающие, вып. 5).

Бронштейн М.М., Днепровский К.А. Жилище морских зверобоев древней Чукотки // Памятники культуры. Новые открытия: письменность, искусство, археология. – М.: Наука, 2001. – С. 587–619.

Бронштейн М.М., Днепровский К.А. Эквен: история изучения (1961–2011) // Вехи на мысах: к 80-летию чл.-кор. РАН С.А. Арутюнова. – М.: Изд-во Гос. музея Востока, 2012. – С. 20–31.

Гептнер В.Г., Наумов Н.П., Юргенсон П.Б., Слудский А.А., Чиркова А.Ф., Банников А.Г. Отряд морских коров, или сирен. – М.: Высш. шк., 1967. – С. 15–46. – (Млекопитающие СССР; т. 2, ч. 1: Морские коровы и хищные).

Горлова Е.Н., Васюков Д.Д. Три вида ластоногих в добыче морских зверобоев северо-восточного побережья Чукотки // Зоол. журнал. – 2013. – Т. 92, вып. 9. – С. 1064–1076.

Горлова Е.Н., Крылович О.А., Савинецкий А.Б., Хасанов Б.Ф. Экология кольчатой нерпы (*Pusa hispida*) Берингова пролива в позднем голоцене // Изв. РАН. Сер. биол. – 2012. – Вып. 5. – С. 546–553.

Громова В. Определитель млекопитающих СССР по костям скелета. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – Вып. 1: Определитель по крупным трубчатым костям. – 240 с. – (Тр. Комис. по изуч. четвертич. периода; т. 9).

Громова В. Определитель млекопитающих СССР по костям скелета. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. – Вып. 2: Определитель по крупным костям заплюсны. – 117 с. – (Тр. Комис. по изуч. четвертич. периода; т. 16).

Диков Н.Н. Древние культуры Северо-Восточной Азии: Азия на стыке с Америкой в древности. – М.: Наука, 1979. – 352 с.

Динесман Л.Г. Изучение истории биогеоценозов по нормам млекопитающих // Общие методы изучения истории современных экосистем. – М.: Наука, 1979. – С. 76–101.

Динесман Л.Г., Киселева Н.К., Савинецкий А.Б., Хасанов Б.Ф. Вековая динамика прибрежных экосистем северо-востока Чукотки. – М.: Аргус, 1996. – 189 с.

Динесман Л.Г., Савинецкий А.Б. Количественный учет костей в культурных слоях древних поселений людей // Новейшие археозоологические исследования в России: к столетию со дня рождения В.И. Цалкина. – М.: Языки славян. культуры, 2003. – С. 34–56.

Крупник И.И. Арктическая этноэкология. – М.: Наука, 1989. – 270 с.

Портенко Л.А. Птицы Чукотского полуострова и острова Врангеля. – Л.: Наука, 1972. – Ч. 1. – 424 с.

Ромер А., Парсонс Т. Анатомия позвоночных. – М.: Мир, 1992. – Т. 1. – С. 192–196.

Савинецкий А.Б. Вековая динамика численности морской коровы (*Hydrodamalis gigas* Zimm., 1780) в позднем голоцене // Докл. АН. – 1992. – Т. 326, № 4. – С. 570–572.

Туманов И.Л. Биологические особенности хищных млекопитающих России. – СПб.: Наука, 2003. – 448 с.

Файнберг Л.А. Охотники Американского Севера: Индейцы и эскимосы. – М.: Наука, 1991. – 184 с.

Ambrose S.H. Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis // J. of Archaeol. Sci. – 1990. – Vol. 17, N 4. – P. 431–451.

Bale R.J., Robertson I., Salzer M.W., Loader N.J., Leavitt S.W., Gagen M., Harlan T.P., McCarroll D. An annually resolved bristlecone pine carbon isotope chronology for the last millennium // Quaternary Research. – 2011. – Vol. 76, N 1. – P. 22–29. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2011.05.004>

Balter V., Simon L., Fouillet H., Lécuyer C. Box-modeling of $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in mammals // Oecologia. – 2006. – Vol. 147. – P. 212–222.

Bocherens H., Billiou D., Patou-Mathis M., Bonjean D., Otte M., Mariotti A. Paleobiological implications of the isotopic signatures (^{13}C , ^{15}N) of fossil mammal collagen in Scaldina Cave [Sclayn, Belgium] // Quaternary Research. – 1997. – Vol. 48, N 3. – P. 370–380. – URL: <http://dx.doi.org/10.1006/qres.1997.1927>

Bocherens H., Drucker D. Trophic level isotopic enrichment of carbon and nitrogen in bone collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems // International J. of Osteoarchaeol. – 2003. – Vol. 13, N 1/2. – P. 46–53.

Bond A.L., Hobson K.A. Reporting stable-isotope ratios in ecology: recommended terminology, guidelines and best practices // Waterbirds. – 2012. – Vol. 35, N 2. – P. 324–331. – URL: <http://dx.doi.org/10.1675/063.035.0213>

Bump J.K., Fox-Dobbs K., Bada J.L., Koch P.L., Peterson R.O., Vucetich J.A. Stable isotopes, ecological integration and environmental change: wolves record atmospheric carbon isotope trend better than tree rings // Proceedings of the Royal Society Biol. Sci. Ser. B. – 2007. – Vol. 274, N 1624. – P. 2471–2480. – URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2007.0700>

Chamberlain C.P., Waldbauer J.R., Fox-Dobbs K., Newsome S.D., Koch P.L., Smith D.R., Church M.E., Chamberlain S.D., Sorenson K.J., Risebrough R. Pleistocene to recent dietary shifts in California condors // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2005. – Vol. 102, N 46. – P. 16707–16711. – URL: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0508529102>

Corbett D.G., Causey D., Clementz M., Koch P.L., Doroff A., Lefevre C., West D. Aleut Hunters, Sea Otters, and Sea Cows: Three Thousand Years of Interactions in the Western Aleutian Islands, Alaska // Human Impacts on Ancient Marine Ecosystems: A Global Perspective / eds. C.R. Torben, J.M. Erlandson. – Berkeley: Univ. of California Press, 2008. – P. 43–76.

Craig H. The geochemistry of stable carbon isotopes // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1953. – Vol. 3. – P. 53–92.

Dehn L.-A. Trophic relationships in an Arctic marine food web and implications for trace element dynamics: PhD. – Fairbanks, 2005. – 290 p.

DeNiro M.J. Postmortem preservation and alteration of *in vivo* bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction // Nature. – 1985. – Vol. 317, N 31. – P. 806–809.

DeNiro M.J., Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1978. – Vol. 42, N 5. – P. 495–506.

- DeNiro M.J., Epstein S.** Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1981. – Vol. 45. N 3 – P. 341–351.
- Dienes P.** The isotopic composition of reduce organic carbon // *Handbook of Enviromental isotope Geochemistry* / eds. P. Fritz, J.C. Fontes. – Amsterdam: Elsevier, 1980. – P. 329–406.
- Ehleringer J.R., Rundel P.W.** Stable isotopes: history, units, and instrumentation // *Stable isotopes in ecological research* / eds. P.W. Rundel, J.R. Ehleringer, K.A. Nagy. – N. Y.: Springer Verlag New York Inc. – 1989. – P. 1–15. – (Ecological studies; vol. 68).
- Eichholz M.W., Seding J.S.** Staging, migration, and winter distribution of Canada and cackling geese staging in interior Alaska // *The J. of Wildlife Management*. – 2006. – Vol. 70, N 5. – P. 1308–1315. – URL: [http://dx.doi.org/10.2193/0022-541X\(2006\)70\[1308:SMAWDO\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.2193/0022-541X(2006)70[1308:SMAWDO]2.0.CO;2)
- Feng X.H.** Trends in intrinsic water-use efficiency of natural trees for the past 100–200 years: a response to atmospheric CO₂ concentration // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1999. – Vol. 63. – P. 1891–1903. – URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00088-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00088-5)
- Fogel M.L., Tuross N., Johnson B.J., Miller G.H.** Biogeochemical record of ancient humans // *Organic Geochemistry*. – 1997. – Vol. 27. – P. 275–287.
- France R.L.** Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications // *Marine Ecol. Progress Ser.* – 1995. – Vol. 124. – P. 307–312.
- 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 $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO₂ // *Tellus*. – 1999. – Vol. 51. – P. 170–193. – URL: <http://dx.doi.org/10.1034/j.1600-0889.1999.t01-1-00005.x>
- Fratzl P.** Collagen Diversity, Synthesis and Assembly // *Collagen: Structure and Mechanics* / ed. by P. Fratzl. – N.Y.: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. – P. 1–15.
- Gilbert M.** Mammalian Osteology. – Woodson Way: Missouri Archaeol. Soc., Inc. Press., 1993. – 428 p.
- Gilbert B.M., Martin L.D., Savage H.G.** Avian Osteology. – Laramie: Modern Printing Co, 1985. – 253 p.
- Goericke R., Fry B.** Variations of marine plankton $\delta^{13}\text{C}$ with latitude, temperature, and dissolved CO₂ in the world ocean // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1994. – Vol. 8. – P. 85–90.
- Heaton T.H.E.** Spatial, species, and temporal variations in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of C₃ plants: implications for palaeodiet studies // *J. of Archaeol. Sci.* – 1999. – Vol. 26, N 6. – P. 637–649. – URL: <http://dx.doi.org/10.1006/jasc.1998.0381>.
- Hedges R.E.M., Stevens R.E., Koch P.L.** Isotopes in bones and teeth // *Isotopes in palaeoenvironmental research* / ed. M.J. Leng. – Dordrecht: Springer, 2006. – Vol. 10. – P. 117–146.
- Hedges R.E.M., Stevens R.E., Richards M.P.** Bone as a stable isotope archive for local climatic information // *Quaternary Sci. Rev.* – 2004. – Vol. 23, N 7/8. – P. 959–965. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.022>
- Hesslein R.H., Hallard K.A., Ramlal P.** Replacement of sulfur, carbon, and nitrogen, in tissue of growing broad whitefish (*Coregonus nasus*) in response to a change in diet traced by $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$ // *Canad. J. of Fisheries and Aquatic Sci.* – 1993. – Vol. 50, N 10. – P. 2071–2076. – URL: <http://dx.doi.org/10.1139/f93-230>
- Hillson S.** Teeth. – L.; N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1986. – 376 p.
- Hirons A.C., Schell D.M., Finney B.P.** Temporal record of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in North Pacific pinnipeds: inferences regarding environmental change and diet // *Oecologia*. – 2001. – Vol. 129, N 4. – P. 591–601. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s004420100756>
- Hobson K.A.** Trophic relationships among high Arctic seabirds: insights from tissue-dependent stable-isotope models // *Marine Ecol. Progress Ser.* – 1993. – Vol. 95. – P. 7–18.
- Hobson K.A., Clark R.G.** Assessing avian diets using stable isotopes I: turnover of ^{13}C in tissues // *The Condor*. – 1992. – Vol. 94, N 1. – P. 181–188. – URL: <http://dx.doi.org/10.2307/1368807>
- Hobson K.A., Sease J.L.** Stable isotope analyses of tooth annuli reveal temporal dietary records: an example using steller sea lions // *Marine Mammal Sci.* – 1998. – Vol. 14, N 1. – P. 116–129. – URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.1998.tb00694.x>
- Hobson K.A., Welch H.E.** Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis // *Marine Ecol. Progress Ser.* – 1992. – Vol. 84. – P. 9–18. – URL: <http://dx.doi.org/10.3354/meps084009>
- Hupp J.W., Schmutz J.A., Ely C.R.** The annual migration cycle of emperor geese in Western Alaska // *Arctic*. – 2008. – Vol. 61, N 1. – P. 23–34. – URL: <http://dx.doi.org/10.14430/arctic4>
- Idermühle A., Stocker T.F., Joos F., Fischer H., Smith H.J., Wahlen M., Deck B., Mastroianni D., Tschumi J., Blunier T., Meyer R., Stauffer B.** Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica // *Nature*. – 1999. – Vol. 398. – P. 121–126. – URL: <http://dx.doi.org/10.1038/18158>
- IPCC 2001:** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Linden, van der, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson. – N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2001. – 881 p.
- Jørkov M.L., Heinemeier J., Lynnerup N.** Evaluating bone collagen extraction methods for stable isotope analysis in dietary studies // *J. of Archaeol. Sci.* – 2007. – Vol. 34. – P. 1824–1829. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.020>
- Keeley J.E., Sandquist D.R.** Carbon: freshwater plants // *Plant, Cell & Environment*. – 1992. – Vol. 15. – P. 1021–1035. – URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb01653.x>
- Keeling C.D., Moor W.G., Tans P.P.** Recent trends in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric carbon dioxide // *Nature*. – 1979. – Vol. 277. – P. 121–123.
- Kelly J.F.** Stable isotopes of carbon and nitrogen in the study of avian and mammalian trophic ecology // *Canad. J. of Zoology*. – 2000. – Vol. 78, N 1. – P. 1–27. – URL: <http://dx.doi.org/10.1139/z99-165>
- Koch P.L.** Isotopic study of the biology of modern and fossil vertebrates // *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* / eds. R.H. Michener, K. Lajtha. – Malden; Oxford; Carlton: Blackwell Publishing Ltd, 2007. – P. 99–154.
- Longin K.** New method of collagen extraction for radiocarbon dating // *Nature*. – 1971. – Vol. 230. – P. 241–242.

- Marshall J.D., Brooks J.R., Lajtha K.** Sources of variation in the stable isotopic composition of plants // *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* / eds. R.H. Michener, K. Lajtha. – Malden; Oxford; Carlton: Blackwell Publishing Ltd, 2007. – P. 22–60.
- Martínez del Río C., Wolf N., Carleton S.A., Gannes L.Z.** Isotopic ecology ten years after a call for more laboratory experiments. // *Biol. Rev.* – 2009. – Vol. 84, N 1. – P. 91–111. – URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-185X.2008.00064.x>
- McRoy C.P., Gradinger R., Springer A.M., Bluhm B., Iverson S.J., Budge S.** Stable isotopes reveal food web shifts due to arctic sea ice decline // *Eos Trans. AGU.* – 2004. – Vol. 85, N 17. – abstract #B34A-05. – URL: <http://abstractsearch.agu.org/meetings/2004/SM/sections/B/sessions/B34A/abstracts/B34A-05.html>
- Minagawa M., Wada E.** Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1984. – Vol. 48. – P. 1135–1140. – URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90204-7](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(84)90204-7)
- Misarti N., Finney B., Maschner H., Wooller M.J.** Changes in northeast Pacific marine ecosystems over the last 4500 years: evidence from stable isotope analysis of bone collagen from archeological middens // *The Holocene.* – 2009. – Vol. 19. – P. 1139–1151. – URL: <http://dx.doi.org/10.1177/0959683609345075>
- Mizutani H., Kabaya Y., Wada E.** Nitrogen and carbon isotope compositions relate linearly in cormorant tissues and its diet // *Isotopenpraxis Isotopes in Environmental and Health Studies.* – 1991. – Vol. 27, N 4. – P. 166–168. – URL: <http://dx.doi.org/10.1080/10256019108622500>
- Nagai T., Suzuki N.** Preparation and characterization of several fish bone collagens // *J. of Food Biochemistry.* – 2000. – Vol. 24. – P. 427–436. – URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4514.2000.tb00711.x>
- Newsome S.D., Clementz M.T., Koch P.L.** Using stable isotope biogeochemistry to study marine mammal ecology // *Marine Mammal Sci.* – 2010. – Vol. 26, N 3. – P. 509–572. – URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.2009.00354.x>
- Newsome S.D., Etnier M.A., Kurle C.M., Waldbauer J.R., Chamberlain C.P., Koch P.L.** Historic decline in primary productivity in western Gulf of Alaska and eastern Bering Sea: isotopic analysis of northern fur seal teeth // *Marine Ecol. Progress Ser.* – 2007. – Vol. 332. – P. 211–224. – URL: <http://dx.doi.org/10.3354/meps332211>
- Newsome S.D., Etnier M.A., Monson D.H., Fogel M.L.** Retrospective characterization of ontogenetic shifts in killer whale diets via $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis of teeth // *Marine Ecol. Progress Ser.* – 2009. – Vol. 374. – P. 229–242. – URL: <http://dx.doi.org/10.3354/meps07747>
- Newsome S.D., Koch P.L., Etnier M.A., Aurioles-Gamboa D.** Using carbon and nitrogen isotope values to investigate maternal strategies in northeast Pacific otariids // *Marine Mammal Sci.* – 2006. – Vol. 22, N 3. – P. 556–572. – URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-7692.2006.00043.x>
- O'Leary M.H.** Carbon isotopes in photosynthesis // *Bioscience.* – 1988. – Vol. 38. – P. 328–336.
- Park R., Epstein S.** Carbon isotope fractionation during photosynthesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1960. – Vol. 21. – P. 110–126.
- Pearson S.F., Levey D.J., Greenberg C.H., Martínez del Río C.M.** Effects of elemental composition on the incorporation of dietary nitrogen and carbon isotopic signatures in an omnivorous songbird // *Oecologia.* – 2003. – Vol. 135, N 4. – P. 516–523. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-003-1221-8>
- Petersen M.R.** Observations of emperor geese feeding at Nelson Lagoon, Alaska // *Condor.* – 1983. – Vol. 85. – P. 367–368.
- Peterson B.J., Fry B.** Stable Isotopes in Ecosystem Studies // *Annual Rev. of Ecol. Systems.* – 1987. – Vol. 18. – P. 293–320.
- Post D.M.** Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions // *Ecology.* – 2002. – Vol. 83, N 3. – P. 703–718. – URL: [http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[0703:USITET\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[0703:USITET]2.0.CO;2)
- Rau G.H., Mearns A.J., Young D.R., Olson R.J., Schafer H.A., Kaplan I.R.** Animal $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ correlates with trophic level in pelagic food webs // *Ecology.* – 1983. – Vol. 64. – P. 1314–1318.
- Reitz E.J.** Archaeozoology // *Encyclopedia of Archaeology* / ed. D.M. Pearsall. – San Diego: Elsevier/Academic Press, 2008. – P. 501–508.
- Reitz E.J., Wing E.S.** Zooarchaeology. – N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2008. – 533 p.
- Robbins C.T., Felicetti L.A., Sponheimer M.** The effects dietary protein quality on nitrogen isotope discrimination in mammals and birds // *Oecologia.* – 2005. – Vol. 144. – P. 534–540. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-005-0021-8>
- Schell D.M., Barnett B.A., Vinette K.A.** Carbon and nitrogen isotope ratios in zooplankton of the Bering, Chukchi and Beaufort seas // *Marine Ecol. Progress Ser.* – 1998. – Vol. 162. – P. 11–23. – URL: <http://dx.doi.org/10.3354/meps162011>
- Schoeninger M.J., DeNiro M.J.** Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1984. – Vol. 48. – P. 625–639.
- Sigman D.M., Kash K.L., Casciotti K.L.** Ocean process tracers: nitrogen isotopes in the ocean // *Encyclopedia of Ocean Science* / eds. J.H. Steele, K.K. Turekian, S.A. Thorpe. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – P. 4138–4153.
- Stevens R.E., Jacobi R., Street M., Germonpre M., Conard N.J., Munzel S.C., Hedges R.E.M.** Nitrogen isotope analyses of reindeer (*Rangifer tarandus*), 45,000 BP to 9,000 BP: Palaeoenvironmental reconstructions // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* – 2008. – Vol. 262, N 1/2. – P. 32–45. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.01.019>
- Sulzman E.W.** Stable isotope chemistry and measurement: a primer // *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* / eds. R.H. Michener, K. Lajtha. – Malden; Oxford; Carlton: Blackwell Publishing Ltd, 2007. – P. 1–21.
- Szpak P., Orchard T.J., McKechnie I., Gröcke D.R.** Historical ecology of late Holocene sea otters (*Enhydra lutris*) from northern British Columbia: isotopic and zooarchaeological perspectives // *J. of Archaeol. Sci.* – 2012. – Vol. 39, N 5. – P. 1553–1571. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2011.12.006>
- Tieszen L.L., Boutton T.W., Tesdahl K.G., Slade N.A.** Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: Implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet // *Oecologia.* – 1983. – Vol. 57. – P. 32–37.

To the Chukchi peninsula and to the Tlingit Indians 1881/1982: journals and letters by Aurel and Arthur Krause / ed. by M.W. Falk. – Fairbanks: Univ. of Alaska Press, 1993. – 230 p. – (The Rasmuson Library Historical Translation Ser.; vol. III).

Wada E., Teragaki M., Kobaya Y., Nemoto T. ^{15}N and ^{13}C abundances in the Arctic Ocean with emphasis on the biogeochemical structure of the food web // Deep-Sea Researches. – 1987. – Vol. 34. – P. 829–841.

Whitmore F.C., Jr., Gard L.M., Jr. Steller's Sea Cow (*Hydrodamalis gigas*) of Late Pleistocene Age from Amchitka,

Aleutian Islands, Alaska // Geol. Survey Professional Paper. – 1977. – Vol. 1036. – P. 1–19.

Yakir D. The paper trail of the ^{13}C of atmospheric CO_2 since the industrial revolution period // Environmental Research Letters. – 2011. – Vol. 6, N 3. – Lett. 034007. – URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/034007>

Материал поступил в редколлегию 09.06.2014 г.

Ye.N. Gorlova, O.A. Krylovich, A.V. Tiunov, B.F. Khasanov, D.D. Vasyukov, A.B. Savinetskiy

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS

Pr. Leninskiy, 33, Moscow, 119071, Russia

E-mail: gorlova.k@gmail.com

okrylovich@gmail.com

a_tiunov@mail.ru

bulatfk@gmail.com

tipa2128506@gmail.com

arkadybs@rambler.ru

ISOTOPIC ANALYSIS AS A METHOD OF TAXONOMIC IDENTIFICATION OF ARCHEOZOOLOGICAL MATERIALS

The article discusses the opportunities of carbon (ratio $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) and nitrogen (ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) isotopic signature usage for taxonomic diagnostics of animal bone remains from archaeological sites and other ancient deposits. This work presents the world literature review, reveals the features of isotopic analysis in the context of vertebrate animal ecology and the methodological hardships at work with fossil material. The particular cases also show the successful usage of isotopic analysis for specimen identification of archeozoological remains, especially bones of brown and polar bears, large marine mammals and a few specimens of anseriformes.

Keywords: *stable isotopes, animal bones, taxonomic diagnostics, archeozoology, Ursus, Hydrodamalis gigas.*