

ИЗОТОПНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОЛЛАГЕНА КОСТЕЙ БЕЛОСПИННЫХ АЛЬБАТРОСОВ (*PHOEBASTRIA ALBATRUS*) В РАЙОНЕ БЕРИНГОВА МОРЯ В ГОЛОЦЕНЕ

© 2024 г. О. А. Крылович*, С. В. Самсонов*, Е. А. Кузьмичева*, А. Б. Савинецкий*

*ИПЭЭ РАН им. А.Н. Северцова, Ленинский пр., 33, Москва, 119071 Россия

@ Email: okrylovich@gmail.com

Поступила в редакцию 11.12.2023

После доработки 25.12.2023

Принята к публикации 25.12.2023

Белоспинный альбатрос (*Phoebastria albatrus*) — редкий в наши дни вид птиц, чья численность в голоцене значительно снизилась из-за промысловой деятельности человека. Костные остатки альбатросов из археологических памятников Чукотки, Камчатки и Алеутских о-вов, и из береговых отложений Командорских о-вов были использованы для анализа содержания стабильных изотопов углерода и азота в коллагене костей. Результаты анализа показали, что в голоцене происходила дифференциация изотопных ниш алеутских и командорских альбатросов. Белоспинные альбатросы Алеутских о-вов по изотопным характеристикам ближе к голоценовым альбатросам о. Ванкувер (Канада).

Ключевые слова: Белоспинный альбатрос, *Phoebastria albatrus*, Алеутские о-ва, Командорские о-ва, Берингово море, изотопная ниша, стабильные изотопы, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$.

DOI: 10.31857/S1026347024030129, **EDN:** UZULQM

Белоспинный альбатрос (*Phoebastria albatrus*) в недавнем прошлом был одним из самых многочисленных видов птиц в Северной Пацифике. На протяжении голоцена белоспинные альбатросы использовали для питания океаническую и шельфовую зоны всей северной части Тихого Океана до Берингова пролива на севере. Это известно благодаря многочисленным находкам костей данного вида в прибрежных археологических памятниках Японии, о. Сахалин, Курильских и Алеутских о-вов, Чукотки, о. Св. Лаврентия, тихоокеанского побережья Северной Америки до Калифорнии (Dinesman *et al.*, 1999; Causey *et al.*, 2005; Guiry *et al.*, 2022). В настоящее время белоспинный альбатрос — крайне редкий вид мировой авифауны. Основной причиной сокращения численности считается промысел на немногочисленных гнездовых колониях (всего несколько островов в Восточно-Китайском море) в XIX веке. В 1886 году в Японии была организована фирма, занимающаяся сбором перьев и пуха альбатросов. В течение 15 лет, до 1902 года, на островах, где гнездились эти птицы, было добыто до 5 миллионов экземпляров (Красная книга, 1983). К началу 1940-х гг., после нескольких извержений вулканов в местах гнездования, этот вид считался вымершим (Brooke, 2004). Однако птицы, оставшиеся в море, стали возвращаться на острова и в последнее время благодаря охранным мероприятиям численность белоспинных альбатросов постепенно растет и исчисляется несколькими сотнями особей (Шунтов, 1982; Carboneras *et al.*, 2020).

Из-за невысокой численности и охранного статуса многие вопросы экологии этого вида остаются малоизученными. При этом питание этого вида птиц во время длительных миграций все еще плохо изучено. Немногочисленные данные известны по птицам, погибшим в рыболовных сетях, самыми многочисленными объектами питания которых были кальмары разных видов (Walker *et al.*, 2015). Использование методов спутникового слежения позволило выяснить, что современные белоспинные альбатросы с возрастом начинают отдавать предпочтение определенным районам океана и каждый год возвращаются в одни и те же места (Orben *et al.*, 2018).

Насколько этот выбор может быть постоянным на протяжении многих поколений в масштабах тысячелетий, помогли выяснить исследования с использованием метода анализа содержания стабильных изотопов углерода и азота. Многочисленные костные остатки белоспинных альбатросов из археологических памятников побережья Северной Пацифики стали основой для такого рода исследований (Guiry *et al.*, 2022). Изотопный метод основан на том, что изотопный состав тканей консумента зависит от изотопного состава его диеты (DeNiro and Epstein, 1978, 1981). Особенности содержания тяжелого изотопа углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в тканях организма являются косвенной характеристикой района питания животного в случае морских экосистем (Hobson *et al.*, 1997; Burton, Koch, 1999). Содержание тяжелого изотопа азота ($\delta^{15}\text{N}$) в тканях является

показателем трофического положения животного и в случае морских экосистем, так же, как и с $\delta^{13}\text{C}$, — косвенной характеристикой региона питания (DeNiro, Epstein, 1978, 1981; Minagawa, Wada, 1984; Sigman *et al.*, 2009). Большой набор процессов, регулирующих источники и круговорот углерода и азота в водной среде, приводит к пространственно-временным изменениям изотопного фона биогенных элементов и первичной продукции (Sigman *et al.*, 2009; Guiry, 2019). Это служит основой для отслеживания перемещения животных между изотопно различающимися регионами. Факторы, определяющие изотопный состав первичных продуцентов в океане, включают температуру поверхности моря, концентрацию CO_2 , продуктивность и лимитирование питательных веществ, физиологию и скорость роста фитопланктона, распространённость азотфиксации или денитрификации, а также океанические течения, вызывающие перемешивание между регионами с различными изотопными характеристиками (Rau *et al.*, 1989; Sigman *et al.*, 2009). Эти переменные ответственны за создание широких региональных изотопных различий между пищевыми сетями на всем ареале белоспинных альбатросов. Благодаря этому группы особей, которые постоянно кормятся в определенных регионах, отличающихся друг от друга изотопными характеристиками, имеют характерные изотопные ниши.

Коллаген кости крупных животных содержит усредненный изотопный сигнал диеты за несколько последних лет жизни, что позволяет использовать этот показатель как усредненную характеристику питания/мест обитания за относительно долгий период времени (Hobson, Clark, 1992; Hedges *et al.*, 2007). Изотопные исследования археологических белоспинных альбатросов показали, что на протяжении долгого времени (тысячи лет) часть птиц выбирала для кормления одни и те же участки Тихого океана. Птицы, добытые древними охотниками, например, у берегов Калифорнии (США), в среднем значительно отличались по изотопному составу от птиц, добытых у берегов о. Ванкувер (Британская Колумбия, Канада) или Курильских о-вов (Eda *et al.*, 2012; Vokhshoori *et al.*, 2019; Guiry *et al.*, 2022). В целом изотопный состав альбатросов обусловлен изотопным составом первичной продукции регионов, в которых кормились альбатросы (Vokhshoori *et al.*, 2019).

Цель нашей работы — определить расположение в изотопном пространстве изотопных ниш белоспинных альбатросов из археозоологического материала Алеутских и Командорских о-вов, Чукотки и Камчатки, так как для этих районов подобной информации не было известно ранее. Мы предполагаем, что альбатросы Алеутских и Командорских о-вов использовали на протяжении голоцена для питания одну акваторию и их изотопные ниши будут сильно перекрываться, а изотопный состав будет схожим. При этом наиболее схожими по расположению в изотопном пространстве алеутские и командорские альбатросы будут с альбатросами о. Ванкувер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для нашей работы мы использовали кости белоспинных альбатросов из археологических памятников Алеутских островов из восточной (о. Уналашка), центральной (о. Адак и Четырехсопочные о-ва) и западной (о. Булдырь и о. Шемя) частей гряды, береговых отложений Командорских о-вов (о. Беринга) и археологических памятников Камчатки и Чукотки (табл. 1, рис. 1). Материал был собран в разное время при участии сотрудников Лаборатории исторической экологии ИПЭЭ РАН. Кости из археологического памятника Жупаново (Камчатка) были выбраны из коллекции костей птиц, переданных Е. Н. Курочкиным (ПИН РАН) для определения А. Б. Савинецкому.

Периоды происхождения материала из археологических памятников определены по разбросу радиоуглеродных дат из литературных источников (табл. 1). Период существования памятника UNL-061 на о. Уналашка определен по одной радиоуглеродной дате (NUTA2—26991, 2777 ± 40 радиоуглеродных лет назад) с использованием калибровочной кривой IntCal20 в программе OxCal v4.4.4 (Reimer *et al.*, 2020; Ramsey, 2023). Кости белоспинных альбатросов о. Беринга были собраны в дюнных береговых отложениях. Мы делаем допущение, что эти кости относятся к периоду не позднее XIX века, так как позже численность белоспинных альбатросов резко снизилась и вероятность захоронения остатков птиц в береговых отложениях очень мала.

Для анализа мы выбирали все возможные кости с надежными определительными признаками, так как в предыдущих работах было показано, что в случае белоспинных альбатросов элемент скелета не влияет на изотопный сигнал (Guiry *et al.*, 2022). Так как кости альбатросов достаточно редки в археологическом материале (хоть и встречаются регулярно), мы делаем допущение, что вероятность попадания костей от одной особи в наш материал очень мала.

Отбор материала и выделение коллагена были проведены в Лаборатории исторической экологии ИПЭЭ РАН.

Для анализа содержания стабильных изотопов углерода и азота в коллагене костей для каждого образца было отобрано около 0.5 г костной ткани. Коллаген выделяли по модифицированному методу Лонжина (Longin, 1971; Jørgov *et al.*, 2007; Горлова и др., 2015; Szpak *et al.*, 2017). Вкратце, обработка заключалась в деминерализации костей 1М соляной кислотой, очисткой от органических загрязнений 0.125М раствором NaOH и желатинизации при 70 °C. Далее 300—500 мкг сухого коллагена было использовано для анализа, который проводился в ЦКП “Инструментальные методы в экологии” ИПЭЭ РАН с использованием масс-спектрометра ThermoFinnigan Delta V Plus, сопряженного с элементным анализатором (Thermo Flash 1112)

Соотношение стабильных изотопов ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) представлено в тысячных долях (δ , ‰)

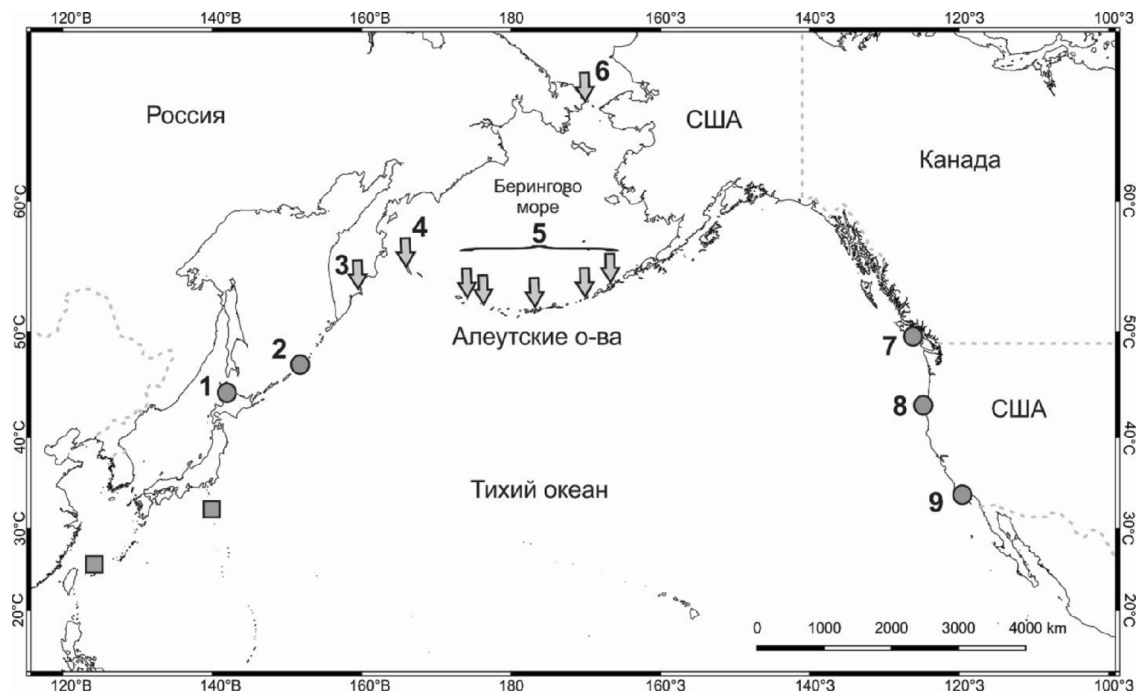


Рис. 1. Карта района исследований — Северная часть Тихого океана. Квадратами отмечены современные гнездовые колонии белоспинных альбатросов, кругами — районы, для которых известна изотопная изменчивость коллагена костей белоспинных альбатросов из археологических памятников побережья Северной Пацифики по литературным данным (Eda *et al.*, 2012; Vokhshoori *et al.*, 2019; Guiry *et al.*, 2022), стрелками — районы с нашими данными по изотопной изменчивости коллагена костей голоценовых белоспинных альбатросов. Регионы: 1 — о. Ребун (Япония), 2 — Курильские о-ва (РФ), 3 — Камчатка (РФ), 4 — Командорские о-ва (РФ), 5 — Алеутские о-ва (США), 6 — Чукотка (РФ), 7 — о. Ванкувер (Канада), 8 — Орегон (США), 9 — Калифорния (США).

Таблица 1. Места и периоды происхождения костей белоспинных альбатросов, использованных для изотопного анализа

Географический район	Археологический памятник/отложение	Период (лет назад)	Штуки
Алеутские о-ва			
о. Уналашка	UNL-061	2900—2700	26
о. Чугинадак	Tanaʼ Agunaʼ Site Unit 1	2800—2000 ⁽¹⁾	2
о. Карлайл	Ulyagan Site Unit 4	2900—1850 ⁽¹⁾	4
	Ulyagan Site Unit 5	~400 ⁽¹⁾	1
о. Адак	ADK-171	~6700 ⁽²⁾	2
	ADK-012	~1850—1500 ⁽³⁾	3
	ADK-011	~400—170 ⁽³⁾	10
о. Булдырь	KIS-008	650—100 ⁽⁴⁾	1
о. Шемья	ATU-061	2700—2000 ⁽⁴⁾	17
	ATU-023	3000—100 ⁽⁴⁾	3
Командорские о-ва			
о. Беринга	Дюны рядом с с. Никольское	До XIX века	12
Камчатка	Жупаново	2000—300 ⁽⁵⁾	5
Чукотка	Канискак	~1300—800 ⁽⁶⁾	3

Примечание. Данные о периодах по: ¹Krylovich *et al.*, 2019; ²Savinetsky *et al.*, 2012; ³Crockford 2012; ⁴Lefèvre *et al.*, 2010; ⁵Брайцева и др., 1983; ⁶Khasanov *et al.*, 2022.

отклонения от международных стандартов (VPDB для $\delta^{13}\text{C}$ и атмосферный азот для $\delta^{15}\text{N}$). Аналитическая погрешность определения изотопного состава (SD при анализе лабораторного стандарта, $n = 6-8$) не превышала 0.2‰.

Вместе с определением изотопного состава в пробе определяли общее содержание углерода и азота (% C, % N) и атомарное соотношение C/N, которые служат индикаторами сохранности белка в древних образцах (DeNiro, 1985, Guiry, Szpak, 2021).

Для сравнения изотопной изменчивости белоспинных альбатросов в пределах северной части Тихого океана мы использовали данные по изотопной изменчивости коллагена костей белоспинных альбатросов из археологических памятников о. Ребун (Япония), Курильских о-вов (Россия), Орегона (США), Калифорнии (США) (Eda *et al.*, 2012; Vokshoori *et al.*, 2019) и о. Ванкувер (Канада) (Guiry *et al.*, 2022).

Для обнаружения различий между значениями $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ коллагена костей белоспинных альбатросов между регионами сразу по двум изотопам мы использовали непараметрический пермутационный многомерный дисперсионный анализ (PERMANOVA), который используется для сравнения групп объектов и проверки нулевой гипотезы о том, что центроиды и дисперсия групп, определенных пространством мер, эквивалентны для всех групп (Anderson, 2014) с последующим многоуровневым попарным сравнением. Для этого были использованы функции *adonis2* пакета “vegan” и пакет “pairwiseAdonis” в программной среде R (Oksanen *et al.*, 2019; R Core Team, 2020; Martinez Arbizu, 2020).

Далее для обнаружения различий по каждому из изотопов мы использовали однофакторный дисперсионный анализ Краскела — Уоллиса (критерий Краскела—Уоллиса) с последующим попарным сравнением (критерий Уилкоксона с поправкой Бенджамина—Хохберга, (Benjamini, Hochberg, 1995)) в программной среде R.

Для сравнения/характеристики размера изотопных ниш альбатросов из разных регионов мы используем площади стандартных изотопных эллипсов, ограничивающих около 40 % выборки (Jackson *et al.*, 2011). Определение площадей стандартных изотопных эллипсов, с поправкой на малый размер выборки (SEAc) и площадь их перекрытия (в %), проведено в пакете “SIBER” среды R (Jackson *et al.*, 2011).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего были получены результаты по содержанию стабильных изотопов азота и углерода в коллагене 89 костей белоспинных альбатросов (табл. 2).

Соотношение содержания общего углерода к азоту (C: N) в коллагене кости является показателем сохранности и незагрязненности коллагена посторонним углеродом (например, гуминовыми кислотами) (DeNiro, 1985). Для костей альбатросов в нашем случае этот показатель 3.26 ± 0.03 (среднее и стандартное отклонение, максимальное — 3.31, минимальное — 3.19), что соответствует хорошей сохранности и допустимым примесям постороннего углерода (Guiry, Szpak, 2021).

Сравнение изотопных подписей альбатросов из разных частей Алеутской островной дуги не выявило значимых различий, поэтому мы объединили результаты для всей островной дуги в одну выборку.

Мы приводим результаты статистических тестов для результатов изотопного анализа альбатросов из археологических памятников Чукотки и Камчатки, но не будем использовать эти результаты в нашем анализе, так как результаты для малых выборок (5 образцов для Камчатки и 3 для Чукотки) считаем ненадежными.

Сравнение по двум изотопам всех регионов Северной Пацифики показало наличие достоверных отличий (PERMANOVA, $F = 16.786$, $p > 0.001$). Дальнейшие попарные сравнения показали, что белоспинные альбатросы Алеутских о-вов в среднем значимо

Таблица 2. Результаты определения содержания стабильных изотопов азота и углерода в коллагене костей белоспинных альбатросов Алеутских и Командорских островов, Камчатки и Чукотки из голоценовых отложений

Остров/группа островов/район	N	$\delta^{13}\text{C}$ M $\pm$ SD	$\delta^{15}\text{N}$ M $\pm$ SD	SEAc
о. Уналашка (восток)	26	-14.4 ± 0.6	18.3 ± 0.8	
Четырехсочные о-ва (центр)	7	-14.4 ± 0.6	17.8 ± 0.7	
о. Адак (центр)	15	-14.1 ± 0.4	18.1 ± 1	
о. Булдырь и Шемя (запад)	21	-14.4 ± 0.6	17.7 ± 1	
Алеутские о-ва (все)	69	-14.4 ± 0.5	18 ± 0.9	1.32
о. Беринга Командорские о-ва	12	-14.5 ± 0.4	17.3 ± 0.7	0.78
Камчатка	5	-14.9 ± 1	16.8 ± 0.4	0.99
Чукотка	3	-15.3 ± 0.3	17.1 ± 1	—

Примечание. M — среднее отклонение, SD — стандартное отклонение, SEAc — площадь стандартного эллипса с поправкой на малый размер выборки.

Таблица 3. Доля перекрытия площадей стандартных изотопных эллипсов (SEAc) и результаты сравнения значений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ белоспинных альбатросов из разных регионов Северной Пацифики

Регионы	Доля перекрытия SEAc (%)	Результаты тестов $p < 0.05$		
		C + N	C	N
Алеутские о-ва				
~ о. Ребун	7.7	< 0.05	< 0.05	< 0.05
~ Курильские о-ва	10.5	< 0.05	< 0.05	—
~ Камчатка	1.7	< 0.05	—	< 0.05
~ Чукотка	—	< 0.05	< 0.05	—
~ Командорские о-ва	26.5	< 0.05	—	< 0.05
~ о. Ванкувер	45.7	—	< 0.05	—
~ Орегон	< 0.001	< 0.05	< 0.05	—
~ Калифорния	9.77	< 0.05	< 0.05	—
Командорские о-ва				
~ о. Ребун	9.72	< 0.05	< 0.05	—
~ Курильские о-ва	2.3	< 0.05	< 0.05	< 0.05
~ Камчатка	23.7	—	—	—
~ Чукотка		—	< 0.05	—
~ о. Ванкувер	12.8	< 0.05	—	< 0.05
~ Орегон	< 0.001	< 0.05	< 0.05	—
~ Калифорния	0.1	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Камчатка				
~ о. Ребун	8.1	< 0.05	< 0.05	—
~ Курильские о-ва	< 0.001	< 0.05	—	< 0.05
~ Чукотка		—	—	—
~ о. Ванкувер	< 0.001	< 0.05	—	< 0.05
~ Орегон	4	—	—	—
~ Калифорния	< 0.001	< 0.05	—	< 0.05

Примечание. C + N — результаты попарного многомерного сравнения, C и N — результаты одномерного попарного сравнения. “—” — $p > 0.05$.

отличаются от альбатросов из всех регионов, кроме птиц о. Ванкувер (табл. 3). Примечательно то, что, вопреки нашим ожиданиям, в целом изотопный состав коллагена костей альбатросов Алеутских и Командорских о-вов в среднем значимо отличается. Дальнейшие сравнения (критерий Краскела—Уоллиса) по каждому изотопу отдельно показали, что и по углероду ($\chi^2 = 129.57$, $df = 8$, $p\text{-value} < 2.2 \times 10^{-16}$), и по азоту ($\chi^2 = 67.281$, $df = 8$, $p\text{-value} = 1.705 \times 10^{-11}$) в исследуемой нами группе регионов есть значимо различные между собой по изотопному составу. Дальнейшие попарные сравнения (критерий Уилкоксона) показали, какие именно регионы отличаются друг от друга и по какому изотопу (табл. 3, рис. 2а, б). Нас в первую очередь интересуют Алеутские и Командорские о-ва и о. Ванкувер. В среднем значения $\delta^{13}\text{C}$ альбатросов Алеутских о-вов не отличаются от таких Командорских о-вов и немного, но достоверно

отличаются от значений птиц о. Ванкувер. Средние значения $\delta^{15}\text{N}$ коллагена алеутских альбатросов достоверно выше $\delta^{15}\text{N}$ альбатросов Командорских о-вов и не отличаются от птиц о. Ванкувер. Площадь стандартных изотопных эллипсов характеризует размер изотопной ниши. Размер изотопной ниши алеутских альбатросов ($1.32\%^2$, табл. 3) превышает размер изотопных ниш командорских и канадских альбатросов (0.8 и $0.8\%^2$). Наибольшее перекрытие площадей стандартных эллипсов наблюдается у альбатросов Алеутских островов и о. Ванкувер (45.7% , табл. 3). Следующие по перекрытию с алеутскими альбатросами группы — Командорские (26.5%) и Курильские о-ва (10.5%). Для остальных районов — перекрытие меньше 10% . Для альбатросов с Командорских о-вов следующая после Алеутских о-вов группа с наибольшим перекрытием — о. Ванкувер (12.8%).

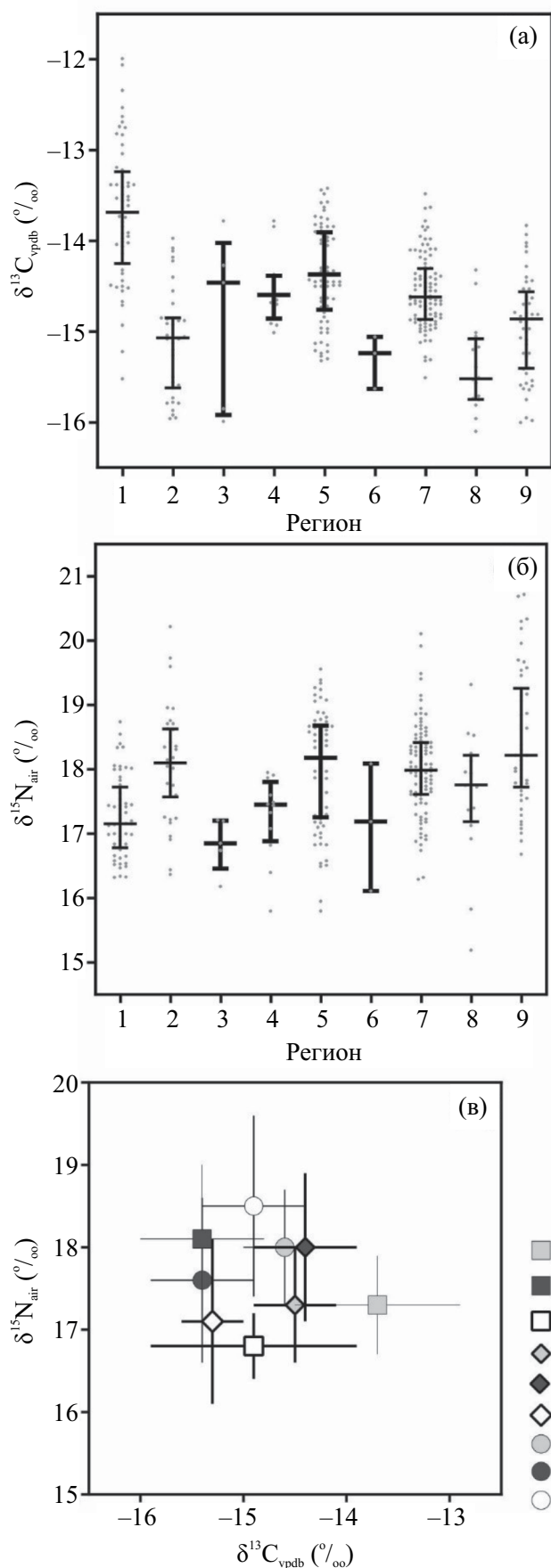


Рис. 2. Изотопная изменчивость коллагена костей белоспинных альбатросов из археологических памятников побережья северной части Тихого Океана. Значения $\delta^{13}C$ (а) и $\delta^{15}N$ (б), горизонтальная линия — медиана, вертикальная линия — межквартильный размах, серые точки — индивидуальные значения каждого образца; в — средние значения и стандартные отклонения $\delta^{13}C$ и $\delta^{15}N$. Регионы: 1 — о. Ребун (Япония), 2 — Курильские о-ва (РФ), 3 — Камчатка (РФ), 4 — Командорские о-ва (РФ), 5 — Алеутские о-ва (США), 6 — Чукотка (РФ), 7 — о. Ванкувер (Канада), 8 — Орегон (США), 9 — Калифорния (США).

←

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные нами результаты об изотопной изменчивости белоспинных альбатросов района Берингова моря в голоцене позволяют дополнить представления об особенностях экологии этого вида до резкого снижения численности в XIX—XX вв.

Для центральной и восточной части Алеутских островов описаны географические паттерны первичной продукции в зависимости от океанических течений, концентрации биогенных элементов и характеристик проливов между островами (Mordy *et al.*, 2005). Наиболее заметная “экологическая граница” проходит по проливу Самальга между восточными и центральными островами. Эти различия приводят к различиям и в первичной биологической продукции, и в содержании стабильных изотопов азота и углерода в фитопланктоне и зоопланктоне (Schell *et al.*, 1998). В западной части Алеутской гряды наблюдается снижение биологической продуктивности по сравнению с восточной частью и меньшее содержание тяжелых изотопов азота и углерода в начальных звеньях пищевых цепей. Однако это не сказалось на изотопном составе голоценовых белоспинных альбатросов Алеутских о-вов, которые не отличаются изотопными подписями из разных частей гряды. Это свидетельствует о том, что алеутские альбатросы не отдавали предпочтений какой-то определенной части гряды и использовали пищевые ресурсы вдоль гряды равномерно. Это подтверждает и относительно большой размер изотопной ниши, который в нашем случае отражает скорее размер региона питания, чем разнообразие пищевых объектов.

Объем нашего материала не позволяет проследить какие-либо изменения изотопной ниши алеутских альбатросов во времени. Но, по аналогии с белоспинными альбатросами о. Ванкувер, мы можем предположить, что изменений в предпочтениях мест питания и у Алеутских альбатросов не происходило.

Обнаруженные нами различия изотопных ниш белоспинных альбатросов Алеутских и Командорских о-вов свидетельствуют о том, что командорские альбатросы выбирали для питания район, отличный от Алеутских о-вов по изотопному фону. Возможно,

это были области Камчатского течения или Западного субарктического круговорота — циклонического апвеллингового круговорота в северо-западной субарктической части Тихого океана, который по своим свойствам отличается от Аляскинского круговорота в северо-восточной субарктической части Тихого океана (Goes *et al.*, 2004; Harrison *et al.*, 2004). В настоящее время отмечаются частые встречи взрослых белоспальных альбатросов на краю шельфа вдоль Алеутских о-вов, где приливные течения и крутой рельеф дна создают сильное вертикальное перемешивание (Piatt *et al.*, 2006; Suryan *et al.*, 2006). Но в районе Командорских о-вов отмечены регулярные встречи молодых птиц (Orben *et al.*, 2018). Возможно, что в голоцене при большей численности белоспальных альбатросов район Командорских островов использовался птицами для питания гораздо активнее, чем в наши дни.

Сильное перекрытие изотопных ниш голоценовых альбатросов Алеутских о-вов и о. Ванкувер может быть связано с большой схожестью разных океанографических параметров этих районов, обусловленной единым происхождением океанических течений — Аляскинского круговорота (циклонический круговорот в заливе Аляска) и Аляскинского струйного течения, которое омывает Алеутские о-ва с юга.

Большой разброс значений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ коллагена археологических белоспальных альбатросов отмечается для всех регионов Северной Пацифики. Это можно объяснить тем, что часть птиц постоянно мигрировала между разными районами Северной Пацифики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа 89 образцов коллагена костей белоспальных альбатросов из отложений различного генезиса Командорско-Алеутской гряды показали, что:

1) Нет значительных различий в значениях $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ коллагена костей альбатросов вдоль Алеутских о-вов, что говорит о том, что птицы, кормившиеся в этом районе в голоцене, равномерно использовали все ресурсы данного региона.

2) Изотопные ниши голоценовых альбатросов Командорских о-вов и Алеутских о-вов перекрывались незначительно. Видимо, командорские птицы в основном использовали для питания районы Западного субарктического круговорота и Камчатки.

3) Изотопные ниши альбатросов Алеутских о-вов и о. Ванкувер значительно перекрываются, хотя и не полностью. Птицы этих регионов использовали для питания зоны влияния Аляскинского струйного течения и Аляскинского круговорота, схожих по океанографическим параметрам.

4) Несмотря на постоянство выбора районов питания большей частью птиц, часть белоспальных альбатросов Северной Пацифики в голоцене мигрировала между регионами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22—24—00988)

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брайцева О.А., Литасова С.Н., Пономаренко А.К. Применение тефрохронологических методов для датирования разреза опорной первобытной стоянки на Восточной Камчатке // Вулканология и Сейсмология. 1983. № 5. С. 18—24.
- Горлова Е.Н., Крылович О.А., Тиунов А.В., Хасанов Б.Ф., Васюков Д.Д., Савинецкий А.Б. Изотопный анализ как метод таксономической идентификации археозоологического материала // Археология, Этнография и Антропология Евразии. 2015. Т. 43. № 1. С. 110—121. [https://doi.org/ 0.17746/1563-0102.2015.43.1.110-121](https://doi.org/0.17746/1563-0102.2015.43.1.110-121)
- Красная книга РСФСР (Животные). М.: Россельхозиздат, 1983. 449 с.
- Шунтов В.П. Отряд трубконосые // Птицы СССР. История изучения. Гагары, поганки, трубконосые. М.: Наука, 1982. С. 352—427.
- Anderson M.J. Permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA) // Wiley statsref: statistics reference online. 2014. P. 1—15. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07841>
- Benjamini Y., Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing // Journal of the Royal statistical society: series B (Methodological). 1995. V. 57. № 1. P. 289—300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Brooke M. Albatrosses and petrels across the world. Oxford University Press, 2004. 499 p.
- Burton R.K., Koch P.L. Isotopic tracking of foraging and long-distance migration in northeastern Pacific pinniped // Oecologia. 1999. V. 119. № 4. P. 578—585.
- Carboneras C., Jutglar F., Kirwan G.M. Short-tailed Albatross (*Phoebastria albatrus*). Birds of the World. Cornell Lab of Ornithology. 2020. <https://doi.org/10.2173/bow.shtalb.01>
- Casey D., Corbett D.G., Lefèvre C., West D.L., Savinetsky A.B., Kiseleva N.K., Khassanov B.F. The palaeoenvironment of humans and marine birds of the Aleutian Islands: three millennia of change // Fisheries

- Oceanography. 2005. V. 14. P. 259—276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2005.00365.x>
- Crockford S.J. Archaeozoology of Adak Island: 6000 years of subsistence history in the central Aleutians // *The People Before: The Geology, Paleocology and Archaeology of Adak Island, Alaska* / British Archaeological Reports International Series. 2012. V. 2322. P. 109—145.
- DeNiro M.J., Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals // *Geochimica Et Cosmochimica Acta*. 1978. V. 42. № 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. V. 45. № 3. P. 341—351.
- DeNiro M.J. Postmortem preservation and alteration of *in vivo* bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction // *Nature*. 1985. V. 317. № 6040. P. 806—809.
- Dinesman L.G., Kiseleva N.K., Savinetsky A.B., Khasanov B.F. Secular dynamics of coastal zone ecosystems of the north-eastern Chukchi peninsula (Chukotka: cultural layers and natural depositions from the last millennia). 1999. 131 p.
- Eda M., Koike H., Kuroo M., Mihara S., Hasegawa H., Higuchi H. Inferring the ancient population structure of the vulnerable albatross *Phoebastria albatrus*, combining ancient DNA, stable isotope, and morphometric analyses of archaeological samples // *Conservation Genetics*. 2012. V. 13. P. 143—151. <https://doi.org/10.1007/s10592-011-0270-5>
- Goes J.I., Sasaoka K., Gomes H. do R., Saitoh S., Saino T.A. Comparison of the Seasonality and Interannual Variability of Phytoplankton Biomass and Production in the Western and Eastern Gyres of the Subarctic Pacific Using Multi-Sensor Satellite Data // *Journal of Oceanography*. 2004. V. 60. P. 75—91. <https://doi.org/10.1023/B:JOCE.0000038320.94273.25>
- Guiry E. Complexities of stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in ancient freshwater ecosystems: implications for the study of past subsistence and environmental change // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2019. V. 7. P. 313. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00313>
- Guiry E., James M., Cheung C., Royle T.C. Four millennia of long-term individual foraging site fidelity in a highly migratory marine predator // *Communications in biology*. 2022. V. 5. № 1. P. 1—9. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03310-2>
- Guiry E.J., Szpak P. Improved quality control criteria for stable carbon and nitrogen isotope measurements of ancient bone collagen // *Journal of Archaeological Science*. 2021. V. 132. P. 105416. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105416>
- Harrison P.J., Whitney F.A., Tsuda A., Saito H., Tadokoro K. Nutrient and Plankton Dynamics in the NE and NW Gyres of the Subarctic Pacific Ocean // *Journal of Oceanography*. 2004. V. 60. P. 93—117. <https://doi.org/10.1023/B:JOCE.0000038321.57391.2a>
- Hedges R.E., Clement J.G., Thomas C.D.L., O'connell T.C. Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: Modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements // *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*. 2007. V. 133. № 2. P. 808—816. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20598>
- Hobson K.A., Clark R.G. Assessing avian diets using stable isotopes I: turnover of ^{13}C in tissues // *Condor*. 1992. V. 94. P. 181—188.
- Hobson K.A., Sease J.L., Merrick R.L., Piatt J.F. Investigating trophic relationships of pinnipeds in Alaska and Washington using stable isotope ratios of nitrogen and carbon // *Marine Mammal Science*. 1997. V. 13. № 1. P. 114—132.
- Jackson A.L., Inger R., Parnell A.C., Bearhop S. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER—Stable Isotope Bayesian Ellipses in R // *Journal of Animal Ecology*. 2011. V. 80. № 3. P. 595—602. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01806.x>
- Jørkov M.L.S., Heinemeier J., Lynnerup N. Evaluating bone collagen extraction methods for stable isotope analysis in dietary studies // *Journal of Archaeological Science*. 2007. V. 34. № 11. P. 1824—1829. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.12.020>
- Khasanov B.F., Fitzhugh B., Nakamura T., Okuno M., Hatfield V., Krylovich O.A., Vasyukov D., West D.L., Zender E., Savinetsky A.B. New data and synthesis of dR estimates from the northern Pacific Ocean // *Quaternary Research*. 2022. V. 108. P. 150—160. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.27>
- Krylovich O.A., Vasyukov D.D., Khasanov B.F., Hatfield V., West D., Savinetsky A.A. Hunter-gatherers subsistence and impact on fauna in the Islands of Four Mountains, Eastern Aleutians, Alaska, over 3000 yr // *Quaternary Research*. 2019. V. 91. № 3. P. 983—1002. <https://doi.org/10.1017/qua.2018.127>
- Lefèvre C., Corbett D., Crockford S., Czederpiltz J., Partlow M., West D. Faunal remains and intersite comparisons // *The People at the End of the World: The Western Aleutians Project and Archaeology of Shemya Island, Alaska* Anthropological Association / Eds Corbett, D., West, D., Lefèvre, C.: Monograph Series, Anchorage. 2010. P. 133—157.
- Longin R. New method of collagen extraction for radiocarbon dating // *Nature*. 1971. V. 230. № 5291. P. 241—242.
- Martinez Arbizu P. pairwiseAdonis: Pairwise multilevel comparison using adonis // R package version 0.4. 2020. V.1. <https://github.com/pmartinezarbizu/pairwiseAdonis>
- 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. V. 48. № 5. P. 1135—1140.
- Mordy C.W., Stabeno P.J., Ladd C., Zeeman S., Wisegarver D.P., Salo S.A., Hunt G.I. Nutrients and primary production along the eastern Aleutian Archipelago // *Fisheries Oceanography*. 2005. V. 14. Suppl. 1. P. 55—76. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2005.00364.x>
- Oksanen J., Blanchet F., Friendly F., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P.R., O'Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens H.H., Szöcs E., Wagner H. Package 'vegan'. Community ecology package, version 2.5—7. 2019. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>

- Orben R. A., Connor A. J., Suryan R. M., Ozaki K., Sato F., Deguchi T. Ontogenetic changes in at-sea distributions of immature short-tailed albatrosses *Phoebastria albatrus* // Endangered Species Research. 2018. V. 35. P. 23–37. <https://doi.org/10.3354/esr00864>
- Piatt J. F., Wetzel J., Bell K., DeGange A. R., Balogh G. R., Drew G. S., Geernaert T., Ladd C., Byrd G. V. Predictable hotspots and foraging habitat of the endangered short-tailed albatross (*Phoebastria albatrus*) in the North Pacific: implications for conservation // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2006. V. 53. № 3–4. P. 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.01.008>
- R Core Team R: a language and environment for statistical computing. Foundation for Statistical Computing. 2020.
- Ramsey C. B. Radiocarbon calibration: from bane to blessing // Radiocarbon. 2023. P. 1–11. <https://doi.org/10.1017/RDC.2023.32>
- Rau G. H., Takahashi T., Marais D. J. D. Latitudinal variations in plankton $\delta^{13}\text{C}$: implications for CO₂ and productivity in past oceans // Nature. 1989. V. 341. № 6242. P. 516–518.
- Reimer P. J., Austin W. E., Bard E., Bayliss A., Blackwell P. G., Ramsey C. B., Butzin M., Cheng H., Edwards R. L., Friedrich M., Grootes P. M., Guilderson T. P., Hajdas I., Heaton T. J., Hogg A. G., Hughen K. A., Kromer B., Manning S. W., Muscheler R., Palmer J. G., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R. W., Richards D. A., Scott E. M., Southon J. R., Turney C. S. M., Wacker L., Adolphi F., Buntgen U., Capano M., Fahrni S. M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Kohler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reining F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP) // Radiocarbon. 2020. V. 62. № 4. P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Savinetsky A. B., West D. L., Antipushina Zh. A., Khassanov B. F., Kiseleva N. K., Krylovich O. A., Pereladov A. M. The reconstruction of ecosystems history of Adak Island (Aleutian Islands) during the Holocene // The People Before: The Geology, Paleoecology and Archaeology of Adak Island, Alaska / British Archaeological Reports International Series. 2012. V. 2322. P. 75–106.
- Schell D. M., Barnett B. A. and Vinette K. A. Carbon and nitrogen isotope ratios in zooplankton of the Bering, Chukchi and Beaufort seas // Marine Ecology Progress Series. 1998. V. 162. P. 11–23.
- Sigman D., Karsh K., Casciotti K. Ocean process tracers: nitrogen isotopes in the ocean // Encyclopedia of Ocean Science / Eds Steele J. H. et al.: Academic Press, 2009. P. 4139–4152.
- Suryan R. M., Sato F., Balogh G. R., Hyrenbach K. D., Sievert P. R., Ozaki K. Foraging destinations and marine habitat use of short-tailed albatrosses: A multi-scale approach using first-passage time analysis // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2006. V. 53. № 3–4. P. 370–386. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.01.012>
- Szpak P., Krippner K., Richards M. P. Effects of Sodium Hydroxide Treatment and Ultrafiltration on the Removal of Humic Contaminants from Archaeological Bone // International Journal of Osteoarchaeology. 2017. V. 27. № 6. P. 1070–1077. <https://doi.org/10.1002/oa.2630>
- Vokhshoori N. L., McCarthy M. D., Collins P. W., Etnier M. A., Rick T., Eda M., Beck J., Newsome S. D. Broader foraging range of ancient short-tailed albatross populations into California coastal waters based on bulk tissue and amino acid isotope analysis // Marine Ecology Progress Series. 2019. V. 610. P. 1–13. <https://doi.org/10.3354/meps12839>
- Walker W. A., Fitzgerald S. M., Collins P. W. Stomach Contents of seven Short-tailed Albatross *Phoebastria albatrus* in the Eastern North Pacific and Bering Sea // Marine Ornithology. 2015. V. 43. P. 169–172.

Isotopic variability of short-tailed Albatrosses bone collagen (*Phoebastria albatrus*) in the Bering Sea area during the holocene

© 2024 O. A. Krylovich*, S. V. Samsonov*, E. A. Kuzmicheva*, A. B. Savinetsky*

*Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia

#E-mail: okrylovich@gmail.com

The short-tailed Albatross (*Phoebastria albatrus*) is a rare bird species today, whose numbers declined significantly in the Holocene due to human fishing activities. Bone remains of albatrosses from archaeological sites of Chukotka, Kamchatka and Aleutian Islands, and from coastal sediments of the Commander Islands were used to analyze the content of stable carbon and nitrogen isotopes in bone collagen. Analysis showed that the isotopic niches of Aleutian and Commander albatrosses diverged during the Holocene. Short-tailed albatrosses of the Aleutian Islands are closer to Holocene albatrosses of Vancouver Island (Canada) by isotopic characteristics.

Key words: Short-tailed Albatross, *Phoebastria albatrus*, Aleutian Islands, Commander Islands, Bering Sea, isotopic niche, stable isotopes, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$.