

К.А. Бабина^{1, 2, 3}✉, С.В. Шнайдер², А.А. Брагина^{1, 3},
А.В. Юмина³, Е.В. Пархомчук^{1, 2, 3}

¹Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия

²ZooSCAn, CNRS – ИАЭТ СО РАН
Международная исследовательская лаборатория, IRL 2013
Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия
E-mail: k.babina@g.nsu.ru

Апробация метода изотопного анализа кислорода зубной эмали для реконструкции сезонности рождения Ovicaprine

Предложен новый метод изотопного анализа кислорода зубной эмали для определения сезона рождения мелкого рогатого скота. Кислород из твердого образца зубной эмали переводится в газообразный CO в результате взаимодействия образца с углеродом в токе гелия при температуре 1300 °C. Данный метод позволяет определять изотопный состав кислорода во всех компонентах зубной эмали, в том числе фосфатах, составляющих 90 масс. % зубной эмали и устойчивых к процессам диагенеза. Традиционно для определения сезонности рождения мелкого рогатого скота используется изотопный анализ карбонатов в зубной эмали, содержание которых составляет всего 4 %. Предложенный метод изотопного анализа кислорода в зубной эмали мелкого рогатого скота не требует многостадийной химической пробоподготовки: для наблюдения минимумов и максимумов в зависимостях вида « $\delta^{18}\text{O}$ – расстояние от шейки зуба» достаточно механической очистки и напыла зубной эмали. Для апробации методики были использованы моляры M1 и M2 двух современных особей Ovicaprine, отобранных в окрестностях поселка Шак-Шак близ города Айдаркен (южный Кыргызстан). Получены циклические вариации $\delta^{18}\text{O}$ в эмали вдоль линии роста моляров современных Ovicaprine, по которым определен сезон рождения исследуемых особей – март – апрель. Впервые предложено использование циклических вариаций $\delta^{18}\text{O}$ вдоль линии роста моляра M1 для определения сезонности рождения мелкого рогатого скота. В работе использован новый внутренний стандарт для изотопного анализа кислорода: SURCAL – кальцит с памятника Сурунгур ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -8,51\text{‰}$).

Ключевые слова: изотопный анализ, кислород, соотношение стабильных изотопов, производящее хозяйство, скотоводство, овцы, Центральная Азия.

К.А. Babina^{1, 2, 3}✉, S.V. Shnaider², A.A. Bragina^{1, 3},
A.V. Yumina³, E.V. Parkhomchuk^{1, 2, 3}

¹Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russia

²ZooSCAn, CNRS – IAET SB RAS
International Research Laboratory, IRL, 2013
Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia
E-mail: k.babina@g.nsu.ru

Oxygen Isotope Analysis of Tooth Enamel for Reconstructing Seasonality of Ovicaprine Birth

A new method of oxygen isotope analysis of tooth enamel for determining the birth season of small cattle is proposed. Oxygen from a solid sample of tooth enamel is converted into gaseous CO through interaction of the sample with carbon in helium flow at a temperature of 1300°C. This method makes it possible to establish the isotopic composition of oxygen in all components of tooth enamel, including phosphates, which constitute 90 wt.% of tooth enamel resistant to diagenesis. Traditionally, isotope analysis of

carbonates in tooth enamel, the content of which is only 4%, has been used for determining the seasonality of birth of small livestock. The proposed method of isotopic analysis does not require multi-stage chemical sample preparation. Mechanical purification and sampling of tooth enamel is sufficient to reveal the minimums and maximums in the dependences “ $\delta^{18}\text{O}$ – distance from the enamel/root junction.” This method was tested on molars M1 and M2 of two modern Ovicaprine animals from the vicinity of the village of Shak-Shak near the city of Aidarken (Southern Kyrgyzstan). Based on the cyclic variations of $\delta^{18}\text{O}$ in enamel along the growth line of molars of modern Ovicaprine, the birth season of the animals – March-April – was established. For the first time, it has been proposed to use cyclic variations of $\delta^{18}\text{O}$ along the growth line of the M1 molar for determining the seasonality of birth of small cattle. A new internal standard for oxygen isotope analysis SURCAL – calcite from the Surungur ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -8.51\text{‰}$) was used in this study.

Keywords: isotope analysis, oxygen, ratio of stable isotopes, productive economy, cattle breeding, sheep, Central Asia.

Введение

Определение сезонности рождения мелкого рогатого скота дает возможность воссоздать использованные стратегии скотоводства. Известно, что для увеличения поголовья скота человеком часто искусственно создаются условия для оката овец дважды в год (весной и осенью). Исследования, проведенные М. Балассе с коллегами, показывают, что эта практика применялась в период ранней доместикации овец в Южной Африке, юго-западе Франции и западном Средиземноморье [Balasse et al., 2003, p. 205; Blaise, Balasse, 2011, p. 3085; Tornero et al., 2020, p. 12798]. Данное направление исследований актуально для выяснения хронологии ранних этапов скотоводства, окат мелкого рогатого скота дважды в год является одним из самых достоверных признаков контроля человека над стадом [Hermes et al., 2022, p. 792].

Изотопный анализ кислорода в образцах зубной эмали, отобранной последовательно вдоль линии роста коренных зубов, с учетом времени прорезывания зубов и полного созревания эмали позволяет реконструировать сезонность рождения мелкого рогатого скота [Balasse et al., 2012, p. 349]. Для определения сезонности рождения используются моляры M2 и M3, завершение прорезывания которых происходит в ок. 1,3 и 2,4 года животного соответственно [Geiger et al., 2020, p. 273]. Изотопный состав кислорода в зубной эмали зависит в первую очередь от изотопного состава воды, поглощаемой животным непосредственно из водоемов, а также с растительной пищей, и таким образом опосредованно отражает климатические факторы в местности пребывания животного во время формирования эмали [Pederzani, Britton, 2019, p. 77]. При наличии сезонности климата в изучаемой местности наблюдаются циклические вариации $\delta^{18}\text{O}$ вдоль линии роста зуба: максимумы кривых соответствуют летнему периоду, минимумы – зимнему.

Зубная эмаль на 96 % состоит из гидроксиапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, в котором гидроксильные группы и фосфат-ионы частично замещены на карбонат-ионы [Ressler et al., 2021, p. 100]. Во всех немногочисленных исследованиях с применением изотопного анализа последовательно отобранных проб зубной эмали мелкого рогатого скота анализируются карбонаты, составляющих всего 4 % гидроксиапатита по массе.

Для получения надежных результатов по $\delta^{18}\text{O}$ в зуб-

ной эмали образцов разного возраста и сохранности наибольший интерес вызывает анализ соотношений изотопов кислорода в фосфатах, поскольку: 1) эмаль почти на 90 % состоит из фосфатов; 2) кислород в фосфатных группах более устойчив к процессам диагенеза в сравнении с кислородом в карбонатах. Работы по изотопному анализу фосфатов, выделенных из последовательно отобранных образцов эмали животных, пока немногочисленны. Были обнаружены циклические изменения $\delta^{18}\text{O}$ в фосфатных группах гидроксиапатита вдоль линии роста моляров M2, M3 бизонов [Bernard et al., 2009, p. 133], M3 вилорогов [Fraser et al., 2021, p. 17005], M2 лошадей [Fabre et al., 2011, p. 605]. Для анализа фосфатов требуется многостадийный процесс выделения Ag_3PO_4 из зубной эмали.

В рамках данной работы предложен новый метод изотопного анализа кислорода в зубной эмали для определения сезона рождения мелкого рогатого скота, не требующий многостадийной химической пробоподготовки. Для анализа соотношений изотопов кислорода использована современная методика, основанная на восстановлении компонентов эмали углеродом до CO непосредственно в элементном анализаторе, который используется в тандеме с изотопным масс-спектрометром.

Материалы и методы исследования

Для апробации методики определения сезона рождения мелкого рогатого скота в августе 2022 г. в окрестностях пос. Шак-Шак близ г. Айдаркен (южный Кыргызстан) были отобраны две челюсти Ovicaprine. Для изотопного анализа кислорода эмали были использованы коренные моляры M1 и M2. Поселок Шак-Шак располагается в северных склонах Алайского хребта, вблизи от ущелья Гауян (Гавиан), на высоте 2 000 м над ур. м., в непосредственной близости г. Айдаркен. Данный регион характеризуется резко континентальным климатом с выраженной и снежной зимой, средние температуры зимой составляют от -15 до -20 градусов, летом – от $+25$ до $+30$ градусов. Местное население занимается преимущественно сельским хозяйством, используется отгонное скотоводство овец и коз, также в регионе разводят коров и лошадей. Из агрокультур здесь выращивают ячмень, пшеницу, кукурузу, картофель и разводят плодовые деревья, такие как яблони, урюк, грецкий орех.

Зачистку и напил зубной эмали всех зубов производили с помощью гравера (Dremel) и набора фрез. Напил эмали выполняли со щечной стороны зуба от шейки до кончика перпендикулярно оси роста зуба с шагом от 2 до 4 мм, глубиной ок. 1 мм.

Порошки образцов взвешивали по 800–1000 мкг на аналитических весах высокой точности с ценой деления 10^{-6} г (ME36S, Sartorius) и запечатывали в специальные серебряные капсулы. Непосредственно перед анализом образцы помещали в карусель автосамплера HCNS-анализатора FLASH 2000 (Thermo Scientific). Анализ стабильных изотопов $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ проводили при помощи двух приборов: HCNS-анализатора FLASH 2000 (Thermo Scientific) в режиме пиролиза и газового изотопного масс-спектрометра «Delta V Advantage». В качестве стандарта для измерения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ использовали внутренний стандарт SURCAL: $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -8,51$ ‰. Отношения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ представляли относительно международного стандарта, кальцита роста белемнита (PDB) из верхнемеловой формации Пи-Ди (Южная Каролина, США), в виде: $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = (R_{\text{exp}}/R_{\text{st}} - 1) \cdot 1000$, где R_{exp} и R_{st} – это отношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в исследуемом веществе и стандарте соответственно; δ -величины выражаются в промилле (‰).

Результаты и обсуждения

Новый стандарт для изотопного анализа кислорода: кальцит с памятника Сурунгур

На памятнике Сурунгур было обнаружено месторождение кальцита (рис. 1, а). Получены результаты изотопного анализа предварительно перемолотого

и прокаленного кальцита с памятника Сурунгур – SURCAL и импортного кальцита – IAEA-603 (рис. 1, б). Для серий обоих образцов характерно одинаковое среднее квадратичное отклонение, составляющее 0,6 ‰. Таким образом, высокое качество кальцита с памятника Сурунгур позволяет использовать его в качестве внутреннего стандарта для изотопного анализа кислорода. Значение $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ для SURCAL ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -8,51$ ‰) определяли относительно IAEA-603 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} = -2,37$ ‰). Для изотопного анализа кислорода в зубной эмали Ovicaprine далее использовали SURCAL (рис. 1).

Описание челюстей и зубов современных Ovicaprine

Челюсти обеих особей содержат молочные премоляры dp2, dp3, dp4, а также коренные моляры M1 и M2. В челюсти особи 1 имеются молочные резцы с признаками истирания, моляра M3 не обнаружено (рис. 2). Поскольку смена центральных молочных резцов происходит в 15 месяцев, а премоляров – в 17 месяцев, животные погибли ранее 17 месяцев [Silver, 1963, p. 283]. На рисунке (рис. 3) представлены фотографии исследуемых зубов после напила образцов эмали с разных ракурсов. Отсутствие признаков истирания жевательных поверхностей моляров M1 и M2 и открытость апикальных отверстий корней указывают на возраст гибели животных менее 15 месяцев [Клевезаль, 2007]. Видно, что моляр M2 особи 2 полностью сформирован, его длина превышает длину M1 на 6 мм. Поскольку M2 формируется ок. 12 месяцев, возраст гибели особи 2 лежит в диапазоне 12–15 месяцев. Моляр M2 особи 1 находится в процессе прорезывания, в области шейки зуба

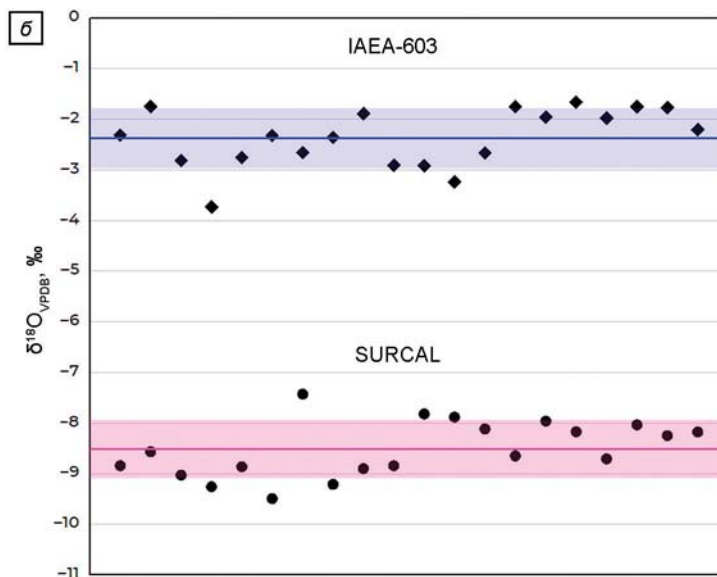


Рис. 1. Фото кальцита на памятнике Сурунгур (а), результаты изотопного анализа кислорода в образцах кальцита (б): IAEA-603 – международный стандарт, SURCAL – внутренний стандарт.

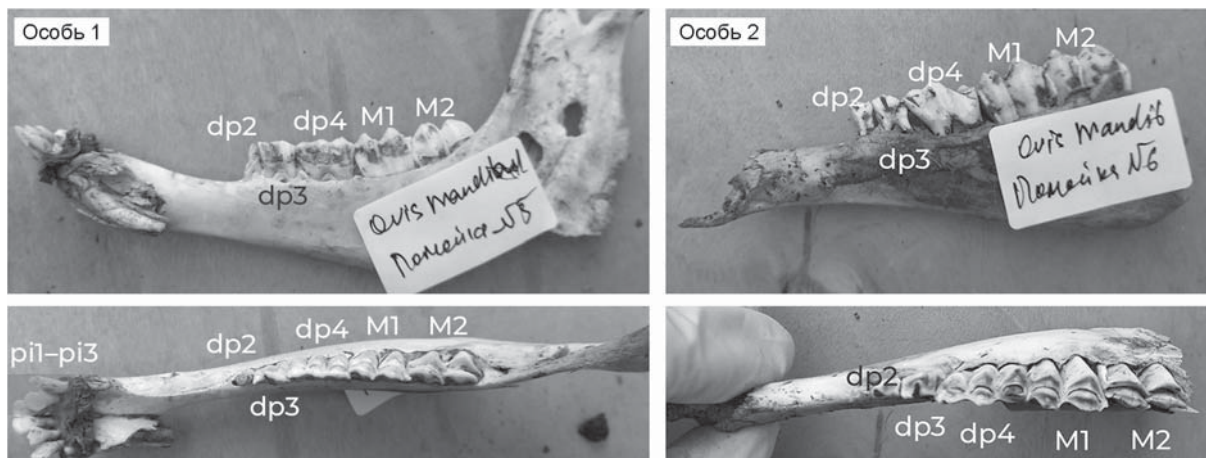


Рис. 2. Фотографии исследуемых челюстей Ovicaprine.

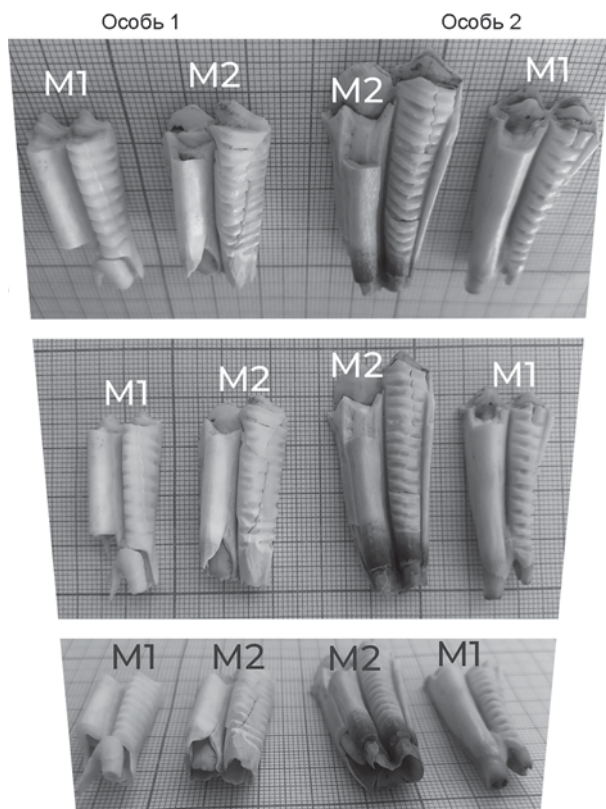


Рис. 3. Фотографии исследуемых моляров M1 и M2 Ovicaprine со следами напилы для отбора проб.

не завершено созревание эмали, длина M2 превышает длину M1 всего на 2 мм, следовательно, возраст гибели животного составляет 6–10 месяцев.

Особенности изотопного анализа кислорода в зубной эмали для определения сезона рождения

Исследуемые зубы были зачищены, напил эмали производился последовательно вдоль линии роста зубов с шагом 2–4 мм (рис. 3). Следует подчеркнуть, что

представленная методика изотопного анализа кислорода в зубной эмали в корне отличается от методики, которую применяют другие исследователи сезонности рождения: в данной работе анализируется кислород в составе как фосфатных, так и карбонатных групп гидроксиапатита.

В традиционных методиках анализируются карбонаты, составляющие менее 5 % гидроксиапатита по массе. Для получения циклических вариаций $\delta^{18}\text{O}$ в эмали вдоль линии роста зуба по анализу карбонатов требуется тщательная химическая пробоподготовка для удаления органических веществ и экзогенных карбонатов. Для удаления гуминовых кислот, образовавшихся в результате разложения биоорганических соединений в почве, образцы эмали обрабатывают окислителем – 2 масс. % водным раствором гипохлорита натрия (NaOCl) [Balasse et al., 2012, p. 349] или 30%-ным раствором пероксида водорода (H_2O_2) [Koch et al. 1997, p. 417]. На втором этапе для удаления экзогенных карбонатов в большинстве исследований образцы эмали обрабатывают 0,1 М раствором уксусной кислоты при комнатной температуре в течение 4 ч [Hermes et al., 2019, 20191273; Ventresca Miller et al., 2020, p. 41; Makarewicz et al., 2017, p. 1; Stevens et al., 2011, p. 64; Knockaert et al., 2018, p. 60]. В исследованиях [Tornero et al., 2013, p. 4039] было измерено изменение массы образца после кислотной обработки – масса уменьшается на 30–40 %. Таким образом, данная методика приводит к частичному удалению целевого вещества для изотопного анализа, поскольку pH раствора 0,1 М CH_3COOH составляет 2,9, а гидроксиапатиты начинают заметно растворяться уже при $\text{pH} < 4,5$.

В климатических исследованиях требуется многостадийный процесс выделения Ag_3PO_4 из зубной эмали, поскольку небольшие примеси могут повлиять на абсолютные значения $\delta^{18}\text{O}$, необходимые для реконструкции температуры окружающей среды прошлого. Процесс выделения Ag_3PO_4 достаточно трудоемкий: образцы зубной эмали, предварительно очищенные

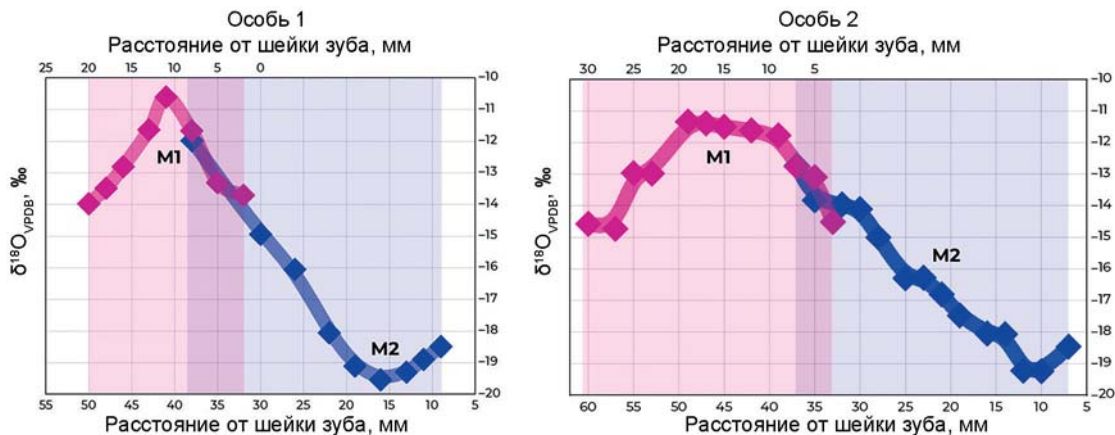


Рис. 4. Зависимости $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ в эмали моляров M1, M2 особей 1 и 2 от расстояния от шейки зуба.

от органических веществ и экзогенных карбонатов, растворяют в 20%-ном растворе HF, затем отделяют жидкую фракцию с помощью центрифугирования, доводят растворы до pH = 5–7, добавляя по каплям 20%-ный раствор аммиака, далее для выделения фосфата серебра к растворам приливают AgNO_3 , полученный $\text{Ag}_3(\text{PO}_4)_3$ несколько раз промывают деионизованной водой, затем высушивают [Tudge, 1960, p. 81].

В рамках нашей работы анализ всего кислорода в составе эмали позволяет получать циклические вариации $\delta^{18}\text{O}$ без предварительной пробоподготовки (рис. 4). Изотопный анализ кислорода проводится в режиме пиролиза: в присутствии углерода в токе гелия при температуре 1 300 °C происходит переход всего содержащегося в образце кислорода в CO , который анализируется на изотопном масс-спектрометре. Информация об относительном расположении экстремумов $\delta^{18}\text{O}$, соответствующих зимним и летним месяцам созревания эмали, достаточна для определения сезонности рождения.

Определение сезона рождения по циклическим вариациям $\delta^{18}\text{O}$ в эмали моляров M1 и M2 современных *Ovis caprine*

Для образцов эмали моляров M1 и M2 из нижней челюсти современных домашних *Ovis caprine*, живших в окрестностях поселка Шак-Шак, наблюдаются циклические зависимости вида « $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ – расстояние от шейки зуба» (рис. 4). Направление оси абсцисс на графиках совпадает со временем прорезывания зубов – от кончика к корню. Для моляров M1 и M2 циклические кривые представлены со сдвигом для демонстрации участков зубов, сформировавшихся в один и тот же период времени.

Величины $\delta^{18}\text{O}$ в зубной эмали исследуемых зубов лежат в диапазоне от –19,5 до –10,5 ‰. Участки эмали

с максимальными и минимальными значениями $\delta^{18}\text{O}$ находятся в середине моляров M1 и ближе к шейкам моляров M2 соответственно. Для определения сезонности рождения *Ovis caprine* по изотопному составу кислорода в эмали традиционно используют моляр M2, формирующийся в первый год жизни животных. Также возможно использовать моляр M3, однако вследствие широкого диапазона времени прорезывания данного зуба точность определения сезона рождения мелкого рогатого скота низкая. У *Ovis aries* моляр M2 начинает закладываться на втором месяце жизни, однако процесс созревания эмали длится ок. 4 месяцев [Zazzo et al. 2010], поэтому для определения сезона рождения по циклическим вариациям $\delta^{18}\text{O}$ вдоль линии роста M2 необходимо учитывать суммарный сдвиг ок. 5 месяцев [Balasse et al., 2012, p. 349]. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в эмали на кончиках моляров M2 близки к максимумам и соответствуют концу лета (август), а если учесть сдвиг 5 месяцев, то получаем сезон рождения исследуемых животных – ранняя весна (март – апрель). По свидетельствам местных жителей типичное время окота овец в поселке Шак-Шак приходится на начало весны.

Определение сезонности рождения по вариациям $\delta^{18}\text{O}$ вдоль линии роста моляра M1 в литературе не найдено. Рассмотрим стадии формирования моляра M1: закладка моляра происходит в пренатальный период в среднем на 56 день беременности овцы, беременность длится примерно 150 дней [Witzel et al., 2018]. Следовательно, моляр M1 формируется три месяца до рождения особи, а прорезывание M1 полностью завершается к 6 месяцам жизни животного [Silver, 1963, p. 283]. Если созревание эмали M1 длится 4 месяца, то величина $\delta^{18}\text{O}$ на кончике моляра M1 должна с точностью до месяца показывать время рождения особи. Для обеих исследуемых особей значения $\delta^{18}\text{O}$ на кончике M1 и расположение относительно максимума указывает на рождение животных в марте – апреле.

Заклучение

Для определения сезонности рождения Ovicaprine предложен метод изотопного анализа кислорода в зубной эмали с использованием современной методики, основанной на восстановлении компонентов эмали углеродом до CO непосредственно в элементном анализаторе, который используется в тандеме с изотопным масс-спектрометром. Преимуществом данной методики изотопного анализа по сравнению с традиционным анализом карбонатов является: 1) отсутствие длительной и трудоемкой химической пробоподготовки; 2) изотопный анализ всего кислорода в эмали, 90 % которой состоит из фосфатов, устойчивых к процессам диагенеза. Впервые предложено использование моляров M1 для определения сезонности рождения мелкого рогатого скота. Для решения исследовательских задач, направленных на выявление сезонности рождения без необходимости проведения палеоэкологических реконструкций, достаточно информации о расположении минимумов и максимумов $\delta^{18}\text{O}$ вдоль линии роста зуба.

Благодарности

Работа проведена при поддержке проекта РФФ № 23-28-01126 «Изотопный анализ зубной эмали для реконструкции сезонности рождения мелкого рогатого скота в период раннего одомашнивания на основе материалов поселения Джейтун (Северный Копетдаг)». Коллектив авторов выражает благодарность PhD Уильяму Рендю (Национальный центр научных исследований Франции (CNRS)) и канд. ист. наук Чаргынову Темирлану Таштанбековичу (Кыргызский национальный университет им. Ж. Баласагына) за определение возраста гибели исследуемых Ovicaprine.

Список литературы

Клевезаль Г.А. Принципы и методы определения возраста млекопитающих. – М.: Т-во научных изданий КМК, 2007. – 283 с.

Balasse M., Obein G., Ughetto-Monfrin J., Mainland I. Investigating seasonality and season of birth in past herds: a reference set of sheep enamel stable oxygen isotope ratios // *Archaeometry*. – 2012. – Vol. 54, N 2. – P. 349–368.

Balasse M., Smith A.B., Ambrose S.H., Leigh S.R. Determining Sheep Birth Seasonality by Analysis of Tooth Enamel Oxygen Isotope Ratios: The Late Stone Age Site of Kasteelberg (South Africa) // *J. Archaeol. Sci.* – 2003. – Vol. 30, N 2. – P. 205–215.

Bernard A., Daux V., Lecuyer C., Brugal J.-Ph., Genty D., Wainer K., Gardien V., Fourel F., Jaubert J. Pleistocene seasonal temperature variations recorded in the $\delta^{18}\text{O}$ of *Bison priscus* teeth // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2009. – Vol. 283, N 1–4. – P. 133–143.

Blaise E., Balasse M. Seasonality and season of birth of modern and late Neolithic sheep from south-eastern France using tooth enamel $\delta^{18}\text{O}$ analysis // *J. Archaeol. Sci.* – 2011. – Vol. 38, N 11. – P. 3085–3093.

Fabre M., Lecuyer Ch., Brugal J.-Ph., Amiot R., Fourel F., Martineau F. Late Pleistocene climatic change in the French Jura (Gigny) recorded in the $\delta^{18}\text{O}$ of phosphate from ungulate tooth enamel // *Quaternary Research*. – 2011. – Vol. 75, N 3. – P. 605–613.

Fraser D., Kim S.L., Welker J.M., Clementz M.T. Pronghorn (*Antilocapra americana*) enamel phosphate $\delta^{18}\text{O}$ values reflect climate seasonality: Implications for paleoclimate reconstruction // *Ecology and Evolution*. – 2021. – Vol. 11, N 23. – P. 17005–17021.

Geiger M., Marron S., West A.R., Asher R.J. Influences of Domestication and Island Evolution on Dental Growth in Sheep // *J. of Mammalian Evolution*. – 2020. – Vol. 27. – P. 273–288.

Hermes T.R., Frachetti M.D., Doumani Dupuy P.N., Mar'yashev A., Nebel A., Makarewicz C.A. Early integration of pastoralism and millet cultivation in Bronze Age Eurasia // *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* – 2019. – Vol. 286, N 1910. – P. 20191273.

Hermes T.R., Schmid C., Tabaldiev K., Matuzeviciute G.M. Carbon and oxygen stable isotopic evidence for diverse sheep and goat husbandry strategies amid a Final Bronze Age farming milieu in the Kyrgyz Tian Shan // *Int. J. Osteoarchaeol.* – 2022. – P. 792–803.

Knockaert J., Balasse M., Rendu C., Burens A., Campmajo P., Carozza L., Bousquet D., Fiorillo D., Vigne J.-D. Mountain adaptation of caprine herding in the eastern Pyrenees during the Bronze Age: A stable oxygen and carbon isotope analysis of teeth // *Quat. Int.* – 2018. – Vol. 484. – P. 60–74.

Koch P.L., Tuross N., Fogel M.L. The Effects of Sample Treatment and Diagenesis on the Isotopic Integrity of Carbonate in Biogenic Hydroxylapatite // *J. Archaeol. Sci.* – 1997. – Vol. 24, N 5. – P. 417–429.

Makarewicz C.A., Pederzani S. Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and carbon ($\delta^{13}\text{C}$) isotopic distinction in sequentially sampled tooth enamel of co-localized wild and domesticated caprines: Complications to establishing seasonality and mobility in herbivores // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* – 2017. – Vol. 485. – P. 1–15.

Pederzani S., Britton K. Oxygen isotopes in bioarchaeology: Principles and applications, challenges and opportunities // *Earth-Science Rev.* – 2019. – Vol. 188. – P. 77–107.

Ressler A., Žužić A., Ivanišević I., Kamboj N., Ivanković H. Ionic substituted hydroxyapatite for bone regeneration applications: A review. *Open Ceramics*. – 2021 – Vol. 6. – P. 100–122.

Silver I. The ageing of domestic animals // *Science in Archaeology* / eds. D. Brothwell, E.S. Higgs. – London: Thames and Hudson, 1963 – P. 283–302.

Stevens R.E., Balasse M., O'Connell T.C. Intra-tooth oxygen isotope variation in a known population of red deer: Implications for past climate and seasonality reconstructions //

Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. – 2011. – Vol. 301, N 1–4. – P. 64–74.

Tornero C., Balasescu A., Ughetto J., Voinea V.M., Balasse M. Seasonality and season of birth in early Eneolithic sheep from Cheia (Romania): methodological advances and implications for animal economy // *J. Archaeol. Sci.* – 2013. – Vol. 40, N 11. – P. 4039–4055.

Tornero C., Balasse M., Bréhard S., Carrère I., Fiorillo D., Guilaine J., Vigne J.-D., Manen C. Early evidence of sheep lambing de-seasoning in the Western Mediterranean in the sixth millennium BCE // *Sci. Rep.* – 2020. – Vol. 10, N 1. – P. 12798.

Tudge A. A method of analysis of oxygen isotopes in orthophosphate – its use in the measurement of paleotemperatures // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1960. – Vol. 18, N 1–2. – P. 81–93.

Ventresca Miller A.R., Haruda A., Varfolomeev V., Goryachev A., Makarewicz C.A. Close management of sheep in ancient Central Asia: evidence for foddering, transhumance, and extended lambing seasons during the Bronze and Iron Ages // *STAR Sci. Technol. Archaeol. Res.* – 2020. – Vol. 6, N 1. – P. 41–60.

Witzel C., Kierdorf U., Frölich K., Kierdorf H. The pay-off of hypsodonty – timing and dynamics of crown growth and wear in molars of Soay sheep // *BMC Evolutionary Biology.* – 2018. – Vol. 18, N 207. – P. 1–14.

Zazzo A., Balasse M., Passey B.H., Moloney A.P., Monahan F.J., Schmidt O. The isotope record of short- and long-term dietary changes in sheep tooth enamel: Implications for quantitative // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2010. – Vol. 74. – P. 3571–3586.

References

Balasse M., Obein G., Ughetto-Monfrin J., Mainland I. Investigating seasonality and season of birth in past herds: a reference set of sheep enamel stable oxygen isotope ratios. *Archaeometry*, 2012. Vol. 54, N 2. P. 349–368.

Balasse M., Smith A.B., Ambrose S.H., Leigh S.R. Determining Sheep Birth Seasonality by Analysis of Tooth Enamel Oxygen Isotope Ratios: The Late Stone Age Site of Kasteelberg (South Africa). *Journal of Archaeological Science*, 2003. Vol. 30, N 2. P. 205–215.

Bernard A., Daux V., Lecuyer C., Brugal J.-Ph., Genty D., Wainer K., Gardien V., Fourel F., Jaubert J. Pleistocene seasonal temperature variations recorded in the $\delta^{18}\text{O}$ of Bison priscus teeth. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009. Vol. 283, N 1–4. P. 133–143.

Blaise E., Balasse M. Seasonality and season of birth of modern and late Neolithic sheep from south-eastern France using tooth enamel $\delta^{18}\text{O}$ analysis. *Journal of Archaeological Science*, 2011. Vol. 38, N 11. P. 3085–3093.

Fabre M., Lecuyer Ch., Brugal J.-Ph., Amiot R., Fourel F., Martineau F. Late Pleistocene climatic change in the French Jura (Gigny) recorded in the $\delta^{18}\text{O}$ of phosphate from ungulate tooth enamel. *Quaternary Research*, 2011. Vol. 75, N 3. P. 605–613.

Fraser D., Kim S.L., Welker J.M., Clementz M.T. Pronghorn (*Antilocapra americana*) enamel phosphate $\delta^{18}\text{O}$ values reflect climate seasonality: Implications for paleoclimate reconstruction. *Ecology and Evolution*, 2021. Vol. 11, N 23. P. 17005–17021.

Geiger M., Marron S., West A.R., Asher R.J. Influences of Domestication and Island Evolution on Dental Growth in Sheep. *Journal of Mammalian Evolution*, 2020. Vol. 27. P. 273–288.

Hermes T.R., Frachetti M.D., Doumani Dupuy P.N., Mar'yashev A., Nebel A., Makarewicz C.A. Early integration of pastoralism and millet cultivation in Bronze Age Eurasia. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2019. Vol. 286, N 1910. P. 20191273.

Hermes T.R., Schmid C., Tabaldiev K., Matuzeviciute G.M. Carbon and oxygen stable isotopic evidence for diverse sheep and goat husbandry strategies amid a Final Bronze Age farming milieu in the Kyrgyz Tian Shan. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2022. P. 792–803.

Klevezal G.A. Principy i metody opredelenija vozrasta mlekovitajushhih. Moscow: *Tovarishhestvo nauchnyh izdaniy KMK*, 2007. 283 p. (In Russ.).

Knockaert J., Balasse M., Rendu C., Burens A., Campmajo P., Carozza L., Bousquet D., Fiorillo D., Vigne J.-D. Mountain adaptation of caprine herding in the eastern Pyrenees during the Bronze Age: A stable oxygen and carbon isotope analysis of teeth. *Quaternary International*, 2018. Vol. 484. P. 60–74.

Koch P.L., Tuross N., Fogel M.L. The Effects of Sample Treatment and Diagenesis on the Isotopic Integrity of Carbonate in Biogenic Hydroxylapatite. *Journal of Archaeological Science*, 1997. Vol. 24, N 5. P. 417–429.

Makarewicz C.A., Pederzani S. Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and carbon ($\delta^{13}\text{C}$) isotopic distinction in sequentially sampled tooth enamel of co-localized wild and domesticated caprines: Complications to establishing seasonality and mobility in herbivores. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017. Vol. 485. P. 1–15.

Pederzani S., Britton K. Oxygen isotopes in bioarchaeology: Principles and applications, challenges and opportunities. *Earth-Science Reviews*, 2019. Vol. 188. P. 77–107.

Ressler A., Žužić A., Ivanišević I., Kamboj N., Ivanković H. Ionic substituted hydroxyapatite for bone regeneration applications: A review. *Open Ceramics*, 2021. Vol. 6. P. 100–122.

Silver I. The ageing of domestic animals. In (Eds.) Brothwell D., Higgs E.S. *Science in Archaeology*, London: Thames and Hudson, 1963. P. 283–302.

Stevens R.E., Balasse M., O'Connell T.C. Intra-tooth oxygen isotope variation in a known population of red deer: Implications for past climate and seasonality reconstructions. *Palaeo Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011. Vol. 301, N 1–4. P. 64–74.

Tornero C., Balasescu A., Ughetto J., Voinea V.M., Balasse M. Seasonality and season of birth in early Eneolithic sheep from Cheia (Romania): methodological advances and implications for animal economy. *Journal of Archaeological Science*, 2013. Vol. 40, N 11. P. 4039–4055.

Tornero C., Balasse M., Bréhard S., Carrère I., Fiorillo D., Guilaine J., Vigne J.-D., Manen C. Early evidence of sheep lambing de-seasoning in the Western Mediterranean in the sixth millennium BCE. *Scientific Reports*, 2020. Vol. 10, N 1. 12798 p.

Tudge A. A method of analysis of oxygen isotopes in orthophosphate – its use in the measurement of paleotemperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1960. Vol. 18, N 1–2. P. 81–93.

Ventresca Miller A.R., Haruda A., Varfolomeev V., Goryachev A., Makarewicz C.A. Close management of sheep in ancient Central Asia: evidence for foddering, transhumance, and extended lambing seasons during the Bronze and Iron Ages. *Science and Technology of Archaeological Research*, 2020. Vol. 6, N 1. P. 41–60.

Witzel C., Kierdorf U., Frölich K., Kierdorf H. The payoff of hypsodonty – timing and dynamics of crown growth and wear in molars of Soay sheep. *BMC Evolutionary Biology*, 2018. Vol. 18, N 207. P. 1–14.

Zazzo A., Balasse M., Passey B.H., Moloney A.P., Monahan F.J., Schmidt O. The isotope record of short- and long-term dietary changes in sheep tooth enamel: Implications for quantitative. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010. Vol. 74. P. 3571–3586.

Бабина К.А. <https://orcid.org/0000-0001-6612-678X>

Шнайдер С.В. <https://orcid.org/0000-0003-2230-4286>

Брагина А.А. <https://orcid.org/0000-0001-9256-0475>

Юмина А.В. <https://orcid.org/0009-0004-8240-0522>

Пархомчук Е.В. <https://orcid.org/0000-0003-2200-884X>