

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении геохимических анализов член-корр. РАН В. В. Масленникову и д.г.-м.н. В. В. Мурзину.

Литература

Интерпретация геохимических данных // Под ред. Е. В. Склярова. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. Т. I. 288 с.

Лысенко В. И., Цельмович В. А. Результаты изучения минералогии материала бактериальных палеопостроек миоцена из зон глубинной палеодегазации (юго-западный Крым) // Электронное научное издание «Альманах Пространство и Время». 2017. Вып. 1

Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.

О. П. Шиловский^{1, 2}, Д. В. Киселева³

¹ – Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

² – Музей естественной истории Татарстана, г. Казань
nau@hotmail.ru

³ – Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

Ископаемые клеточные структуры костной ткани ребра парейазавра

Нахождение мягких тканей позвоночных в ископаемом состоянии уже давно признано и описано в работах различных авторов [Martill, 1990; Chen et al., 1998; Manning et al., 2009]. Недавние исследования показали, что не только покровы и компоненты мягких тканей, такие как кожа [Manning et al., 2009], перья и другие покровные структуры [Chen et al., 1998], но и мышечные волокна [Martill, 1990] могут сохраняться в фоссилизированном виде. Так, после деминерализации ископаемых костей позднемелового динозавра *Tyrannosaurus rex* [Schweitzer et al., 2005] были выявлены прозрачные, гибкие, полые кровеносные сосуды, эластичный и упругий материал костной матрицы. Эндогенный белковый материал был изучен из костных фрагментов и мягких тканей другого динозавра – кампанского гадрозавра *Brachylophosaurus canadensis* [Schweitzer et al., 2009]. Остатки эндогенных коллагеновых волокон и структуры, соответствующие предполагаемым остаткам эритроцитов, были исследованы из восьми костных фрагментов меловых динозавров [Bertazzo et al., 2015]; красных и белых кровяных клеточных структур, коллагена и холестерина в кости ранне-юрского ихтиозавра [Plet et al., 2017]. Условия, при которых происходят процессы фоссилизации, приводящие к таким ископаемым находкам, скорее всего, являются исключением, а не правилом [Martill, 1990; Schweitzer et al., 2007; Plet et al., 2017].

Целью работы стало исследование клеточных структур ископаемой костной ткани ребра пермской парарептилии парейазавра *Deltavjatia vjatkensis* (Hartmann-Weinberg, 1937) и оценка степени их сохранности. Образец найден в отложениях ванагонской пачки северодвинского яруса на берегу р. Вятки на Котельничском местонахождении парейазавров [Киселева и др., 2017]. Данные зверообразные рептилии являются более древними, чем перечисленные выше динозавры. Фрагмент ребра был исследован с использованием СЭМ Carl Zeiss AURIGA CrossBeam с ЭДС Oxford instruments Inca X-Max (оператор А. А. Трифонов).

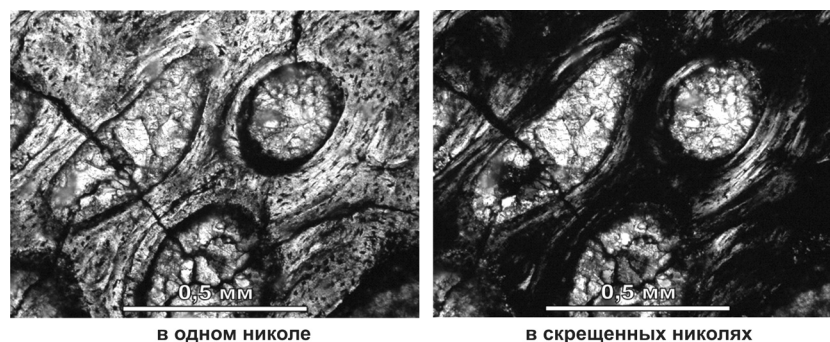


Рис. 1. Срезы концентрических костных пластинок остеонов в виде наслаивающихся друг на друга параллельных фтор-апатитовых и гидроксил-апатитовых минеральных образований.

Исследование фрагмента ископаемого ребра парейазавра показало, что кость имеет четко выраженное строение первичной структуры костной ткани [Киселева и др., 2017]. В шлифах хорошо проявлены структурные элементы плотного (компактного) костного и губчатого вещества кости, такие как костные пластинки, остеоны и гаверсовы каналы, что говорит о хорошей сохранности. Наружные пластинки, внутренние опоясывающие пластинки и остеоны компактного вещества кости, как и костные трабекулы губчатого вещества кости, пигментированы оксидами-гидроксидами железа, придающими красно-бурую окраску всей костной ткани. Мощность области проникновения железистых агрегатов составляет 0.25–1.0 мм. Контакты с неизменными участками резкие, ровные. Подобный характер распределения железистых окантовок и их четкие границы обусловлены, с одной стороны, внешним источником поступления минерализующего вещества, с другой – параллельной пространственной ориентировкой в костной ткани костных пластинок относительно наружных стенок.

Плотная костная ткань представлена различно-ориентированными пластинками: наружными и внутренними опоясывающими, концентрическими, формирующими остеоны, и интерстициальными, заполняющими пространство между остеонами. В скрещенных и параллельных никелях хорошо видны срезы остеонов с отчетливо просматриваемыми лакунами остеоцитов и костными канальцами с отростками остеоцитов. Остеоны представлены наслаивающимися друг на друга параллельно-вытянутыми концентрическими костными пластинками, состоящими из фтор-апатитовых и гидроксил-апатитовых агрегатов (рис. 1). Плотное прилегание фосфатных костных пластинок затрудняет проникновение в костную ткань посторонних минеральных веществ, поэтому в областях плотной костной ткани вторичная минерализация развита слабо либо вообще отсутствует.

Гаверсовы каналы остеонов и межтрабекулярное пространство губчатого вещества кости выполнены различными кристаллическими формами аутигенного кальция [Киселева и др., 2017]. Его зерна образуют плотные незакономерные срастания. В пределах агрегатов можно наблюдать элементы друзового роста, когда под действием фактора геометрического отбора преимущественное развитие получают кальцитовые кристаллы, ориентированные кристаллографической осью *c* перпендикулярно стенкам гаверсовых каналов в остеонах. Как правило, пристеночные области

гаверсовых каналов и межтрабекулярных пространств выполнены кальцитовыми оторочками, состоящими из шестоватых зерен CaCO_3 , форма которых обусловлена замещением соединительнотканного слоя, который выстилает изнутри гаверсовы каналы и внутренние полости (эндост) губчатого вещества кости. От этих оторочек к центру полостей отходят более крупные ромбоэдрические и скаленоэдрические кристаллы кальцита, которые увеличиваясь в размерах, постепенно заполняют все биопустоты. Во многих полостях губчатого вещества кости центральные части выполнены крупными, ксеноморфными кальцитовыми зернами.

По данным ЭДС анализа на участке, соответствующем костной ткани, обнаружены основные элементы Ca, P и F, вероятно, ассоциированные с фтор-апатитом костной ткани; фиксируются также примеси Na, Mg, Al, Si и S. Наличие Fe в составе костной ткани обусловлено пигментацией оксидами-гидроксидами железа. Во вмещающей породе определены Ca, Fe, Si, P, Al, K и Mg, коррелирующие с присутствием кальцита, кварца, хлорита, слюды, альбита и гидроксидов железа в породах [Киселева и др., 2017]. Согласно [Plet et al., 2017], литологические обстановки с наличием обогащенных органическим веществом аргиллитов и известковых конкреций (которые характерны для Котельничского местонахождения парейазавров) способствуют отличной сохранности ископаемой костной ткани, а в некоторых исключительных случаях – и биомолекул этой ткани.

При исследовании трансверсального сечения остеона в гаверсовом канале на его внутренней полости обнаружен сохранившийся участками эндотелий кровеносных и лимфатических сосудов, состоящий из клеток мезенхимного происхождения и выстилающий их внутреннюю поверхность (рис. 2а, б).

На анфиладном сколе кости хорошо видно продольное сечение гаверсова канала, где, по нашим предположениям на основе морфологического сопоставления с современными аналогами [Bergman et al., 1996] и данными [Plet et al., 2017], сохранились форменные элементы крови – белые кровяные клетки (группа лейкоцитов), что может быть обусловлено посмертными процессами – застоем крови, концентрацией лимфатической жидкости, и, как следствие, защитной реакции (фагоцитоз) на инородные тела (бактерии) (рис. 2в, г). В пользу интерпретации ископаемых объектов как форменных элементов крови, а именно лейкоцитов, говорят форма, скульптура и размеры объектов. По результатам полуколичественного ЭДС анализа, для форменных элементов крови (группа лейкоцитов) (рис. 2г) отмечено высокое содержание Fe и присутствие Ca и P. Костное вещество остеона без Fe содержит Ca, P и F, что может свидетельствовать о преимущественно фтор-апатитовом составе костной ткани, а также повышенное содержание Ce и Ni. Присутствие редокс-чувствительных элементов (Ni, Ce) в костной ткани явно демонстрирует наличие различных редокс-микрообстановок в порах в течение ранних стадий осадконакопления [Plet et al., 2017]. Наличие Ce не противоречит полученным ранее данным по цериевым аномалиям, выявленным после валового ИСП МС микроанализа костной ткани фрагмента ребра парейазавра и свидетельствующим о наличии бескислородной восстановительной среды в условиях мелководных прибрежных бассейнов [Киселева и др., 2017].

Таким образом, в результате исследований фрагмента ископаемого ребра пермской парарептилии парейазавра *Deltavjatia vjatkensis* показано, что окружающая литологическая обстановка способствует сохранности ископаемой костной ткани и ее клеточных структур. По результатам СЭМ и ЭДС интерпретированы форменные элементы крови (лейкоциты). Вероятно, это старейшая сохранившаяся белая кровяная

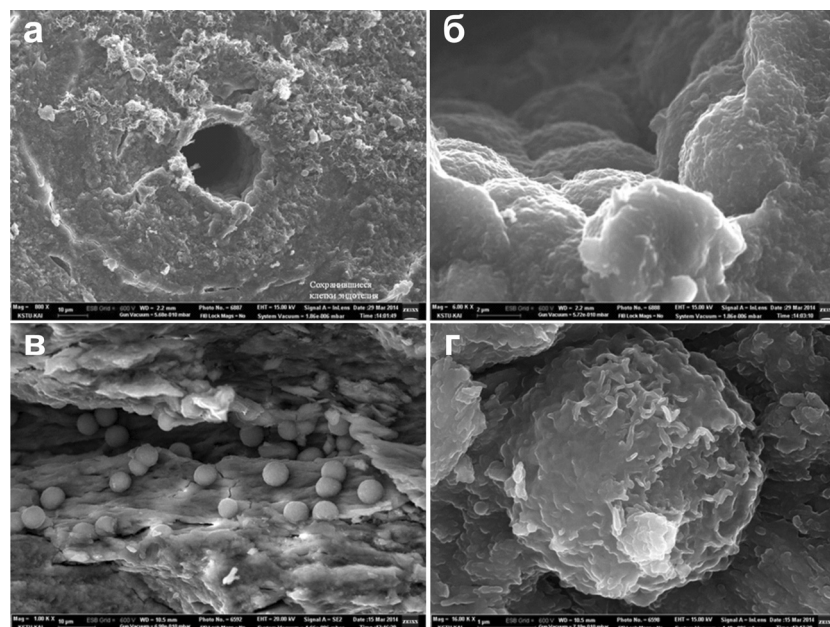


Рис. 2. Трансверсальное сечение остеона (а) с внутренней стенкой гаверсова канала и сохранившимися клетками эндотелия – соединительнотканного слоя, выстилающего внутреннюю поверхность сосудов (б); в) анфиладный скол ребра парейазавра; г) гаверсов канал и форменный элемент крови из группы лейкоцитов (лимфоцит) в его полости.

клеточная структура, описанная к настоящему моменту. Форменные элементы крови и костное вещество имеют различный химический состав: для лейкоцитов характерно высокое содержание Fe и присутствие Ca и P, а для костного вещества остеона – отсутствие Fe, присутствие Ca, P и F и повышенное содержание Se. Минеральная фаза костной ткани соответствует фтор-апатиту. Для подтверждения органической природы обнаруженной клеточной структуры и выявления ее происхождения (бактериального или из клеток крови) планируется провести дальнейшие биомолекулярные исследования.

Литература

- Киселева Д. В., Шиловский О. П., Шагалов Е. С., Рянская А. Д. Особенности состава и структуры пермских тетрапод Котельничского местонахождения (р. Вятка) и их изменения при фоссилизации как основа для палеоэкологических реконструкций // Металлогения древних и современных океанов–2017. Дифференциация и причины разнообразия рудных месторождений. Миасс: ИМин УрО РАН, 2017. С. 249–252.
- Bergman R. A., Afifi A. K., Heidger P. M., D'Alessandro M. P. Atlas of microscopic anatomy: a functional approach, 1996. <http://www.anatomyatlases.org/>.
- Bertazzo S., Maidment S. C. R., Kallepitis C. et al. Fibres and cellular structures preserved in 75-million-year-old dinosaur specimens // Nature Communications. 2015. Vol. 6. ncomms8352.
- Chen P. J., Dong Z.-M., Zhen S.-N. An exceptionally well-preserved theropod dinosaur from the Yixian Formation of China // Nature. 1998. Vol. 391. P. 147–152.

Manning P. L., Morris P. M., McMahon A. et al. Mineralized soft-tissue structure and chemistry in a mummified hadrosaur from the Hell Creek Formation, North Dakota (USA) // Proceedings of the Royal Society B. 2009. Vol. 276. P. 3429–3437.

Martill D. M. Macromolecular resolution of fossilized muscle tissue from an elopomorph fish // Nature. 1990. Vol. 346. P. 171–172.

Plet C., Grice K., Pagès A. et al. Palaeobiology of red and white blood cell-like structures, collagen and cholesterol in an ichthyosaur bone // Nature Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Article number 13776.

Schweitzer M. H., Wittmeyer J. L., Horner J. R., Toporski J. K. Soft-tissue vessels and cellular preservation in *Tyrannosaurus rex* // Science. 2005. Vol. 307. P. 1952–1955.

Schweitzer M. H., Wittmeyer J. L., Horner J. R. Soft tissue and cellular preservation in vertebrate skeletal elements from the Cretaceous to the present // Proceedings of the Royal Society B. 2007. Vol. 274. P. 183–197.

Schweitzer M. H., Zheng W., Organ C. L. et al. Biomolecular characterization and protein sequences of the Campanian hadrosaur *B. Canadensis* // Science. 2009. Vol. 324. P. 626–631.

Д. В. Киселева¹, О. П. Шиловский^{2,3}, М. В. Зайцева¹, Е. А. Панкрушина^{1,4}

¹ – Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург
kiseleva@igg.uran.ru

² – Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

³ – Музей естественной истории Татарстана, г. Казань

⁴ – Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Исследование локальных особенностей фоссилизации костной ткани пермского парейазавра *Deltavjatia vjatkensis*

Для описания свойств материалов с развитой структурой и сложным составом необходимо применение комплексного аналитического подхода. Такие исследования требуют проведения качественного и (полу)количественного анализа изображений, полученного с использованием сканирующей (просвечивающей) электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом, электронно-зондового микроанализа, масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой и лазерной абляцией, рамановской микроспектроскопии и др.

Целью работы стало исследование локальных особенностей состава и структуры ископаемого ребра пермской парарептилии парейазавра *Deltavjatia vjatkensis*, а также зон контакта с вмещающей породой и новообразованными в биопустотах минералами. Изученный фрагмент найден в отложениях ванюшонковской пачки северодвинского яруса на берегу р. Вятки на Котельничском местонахождении парейазавров [Киселева и др., 2017]. Фрагменты были исследованы с использованием СЭМ Carl Zeiss AURIGA CrossBeam с ЭДС Oxford instruments Inca X-Max и последующим определением локального элементного состава в различных программных режимах (оператор А. А. Трифонов).

Микроэлементный состав определен методом квадрупольной масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА ИСП МС) на масс-спектрометре NexION 300S с использованием системы для лазерной абляции NWR 213 (New Wave Research). Операционные параметры лазера: энергия – 3 Дж/см²,