

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.4>

УДК 568.163.3+549.905.1+546.65+546.791

# Особенности аутигенной минерализации и геохимических процессов фоссилизации позвонков морских рептилий (оксфорд-киммеридж Республики Татарстан)

М.С. Глухов<sup>1,2,3\*</sup>, О.П. Шиловский<sup>2</sup>, А.Р. Гайнанова<sup>2,4</sup>, А.И. Муллакаев<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваруцкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия<sup>3</sup>Самаркандский государственный университет им. Шарофа Рашидова, Самарканд, Узбекистан<sup>4</sup>Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, Альметьевск, Россия

Проведены исследования последовательности и условий аутигенного минералообразования в ископаемой костной ткани, а также химического состава и геохимических особенностей процессов фоссилизации позвонков морских рептилий, обнаруженных в нерасчлененных верхнеюрских глинистых отложениях правобережья реки Волги (Тетюшский район, Республика Татарстан). С помощью использованного комплекса оптико-микроскопических, электронно-микроскопических и спектральных методов установлен следующий набор аутигенных минералов, слагающих костные останки: фтор-гидроксилапатит, пирит, барит, гипс, ангидрит, сидерит, кальцит, гематит, гетит, лепидокрокит, кварц и альбит. Морфология, структурно-анатомические особенности строения, минеральный состав и примеси химических элементов в фоссилизированных позвонках позволили установить, что осадконакопление происходило в аноксидной обстановке на дне Среднерусского моря. Механизмами минерализации являлись как биогенные (деятельность сульфатредуцирующих бактерий), так и хемогенные процессы (деятельность сипов), с преобладанием последних. Последовательность стадий минералообразования охватывает ранний и поздний диагенез, катагенез и эпигенез (зона гипергенеза). Положительные аномалии Ce (1,25–1,42) указывают на прибрежно-морскую обстановку процессов осадконакопления в Среднерусском море. Установленные содержания редкоземельных элементов и урана являются весьма привлекательными в контексте дальнейших оценочных исследований котеносных отложений оксфорд-киммериджской толщи глин.

**Ключевые слова:** морские рептилии, оксфорд-киммериджская толща глин, аутигенная минерализация, сульфиды, сульфаты, карбонаты, редкоземельные элементы, уран

**Для цитирования:** Глухов М.С., Шиловский О.П., Гайнанова А.Р., Муллакаев А.И. (2025). Особенности аутигенной минерализации и геохимических процессов фоссилизации позвонков морских рептилий (оксфорд-киммеридж Республики Татарстан). *Георесурсы*, 27(1), с. 101–113. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.4>

## Введение

В мезозойских отложениях Восточно-Европейской платформы обнаруживают весьма интересные локальные рудопроявления, представленные не только конкреционными пиритизированными формами различной морфологии, но и продуктами пиритизации по различным органическим остаткам (Гайнанова, Шиловский, 2022; Гайнанова и др., 2024; Глухов и др., 2023; Королев и др., 2010; Мальков и др., 2004; Николаева и др., 2014; Шиловский, Хасанов, 2020). Последние могут быть представлены высшими растениями (Шиловский,

Хасанов, 2020), строматолитами (Королев и др., 2010; Малёнкина, 2017), раковинами головоногих, брюхоногих и двустворчатых моллюсков (Королев и др., 2010), а также фрагментами скелетов морских рептилий (Мальков и др., 2004; Гайнанова, Шиловский, 2022; Глухов и др., 2023). Местонахождения с такой тафономией редки, что обуславливает возросший интерес к их изучению особенно в последние годы (Шарков, 2014, 2015; Чернышов и др., 2012). Исследователей привлекают не только вопросы палеореконструкций геологического прошлого (Шатров, Войцеховский, 2009), изучение фоссилизации и минералообразования, но, как оказалось, интерес связан и с повышенным количеством содержащихся в органических остатках U, Th и редкоземельных элементов (РЗЭ) (Мальков и др., 2004; Шарков, 2002, 2015; Кудрявцева, Кудрявцев, 2003; Савельева и др., 2019). Содержания лантаноидов, по мнению (Шатров, Войцеховский, 2009), могут быть использованы для реконструкций обстановок

\*Ответственный автор: Михаил Сергеевич Глухов  
e-mail: Gluhov@igg.uran.ru

© 2025 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

осадкообразования в фанерозое, а содержание U, а также Pb, Rb, Sr в биогенных фосфатах является основой для их использования в качестве перспективного геохронометра (Мальков и др., 2004). Однако в отношении последнего утверждения следует учитывать, что даже при использовании современного арсенала методов, решение геохронометрических задач с помощью данного материала в настоящее время является вопросом неоднозначным и достаточно сложным. Для геологов особо привлекательным направлением в таких исследованиях является открытие уникальных ураново-редкометалльных месторождений, обнаруженных в недалеком прошлом (Шарков, 2002, 2014, 2015). Эти экзотические стратиформные месторождения представлены костеносными пластами с находками ихтиофауны, такие имеются в вулканогенно-осадочных толщах верхнего олигоцена (в Казахстане и Калмыкии) (Шарков, 2014, 2015; Тюленева и др., 2014) и карбонатно-глинистых и песчано-глинистых породах верхнего девона Курской магнитной аномалии (Чернышов и др., 2012). Обзор подобных исследований выявил, что уран-редкоземельные элементы обнаружены не только у морских обитателей, но и у динозавров, чьи костные остатки обнаружены в верхнемеловых отложениях (Кудрявцева, Кудрявцев, 2003). В рассмотренных работах среди возможных источников обогащения костеносных горизонтов ураном и редкоземельными элементами авторами рассматривается гидротермальный или наземный латеритно-коровий источник (Мальков и др., 2004; Шарков, 2014, 2015; Чернышов и др., 2012).

Целью настоящей работы является изучение иско-паемой костной ткани позвонков морских рептилий, её изменений в процессе фоссилизации и особенностей аутигенной минерализации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определить минеральный состав и минеральные формы иско-паемой костной ткани, изучить последовательность и условия аутигенного минералообразования, а также химический состав и геохимические особенности процессов фоссилизации позвонков морских рептилий.

## Материалы и методы

Объектами нашего исследования явились фрагменты четырех образцов позвонков морских рептилий №№ 1БГ, 2БГ, 2СР, 3МЛ (рис. 1), которые были собраны на небольшом участке (около 100 м<sup>2</sup>) обнажения правого берега р. Волги (рис. 2), в районе с. Большие Тарханы (Республика Татарстан), расположенного между населенными пунктами Тетюши (Республика Татарстан) и Ундоры (Ульяновская область), в нерасчлененных терригенных верхнеюрских отложениях (оксфорд-киммеридж). Отложения представлены серыми известково-чешуйчатыми глинами, мощностью порядка 6 м, залегающими с размывом на мергелях верхнего келловея (Костылева, Митта, 2011; Митта и др., 2014; Королев и др., 2010; Николаева и др., 2014).

Полевые сборы и исследование геологического материала проводились в период с 2009 по 2012 гг. В течение обозначенного времени несколько раз наблюдался низкий уровень воды в реке Волга, который создал благоприятную обстановку и являлся необходимым условием для успешного проведения поисковых работ. Собранный

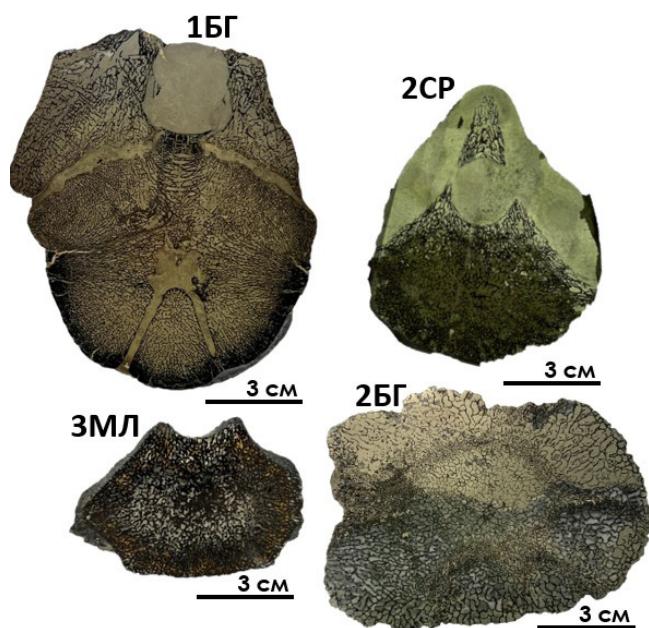


Рис. 1. Фрагменты позвонков морских рептилий. Срезы по фронтальной плоскости

материал изучался в течение нескольких лет, до 2024 года включительно (Гайнанова, Шиловский, 2022; Глухов и др., 2023). В настоящей работе приведены неопубликованные результаты, полученные ранее, и новые данные.

Исследование включало следующий набор методов.

1) Для первичного изучения строения костной ткани, а также морфологии минеральных агрегатов, заполнивших пустотное пространство позвонков, использовалась оптическая микроскопия (бинокулярный микроскоп ЛОМО МСП-1, Россия).

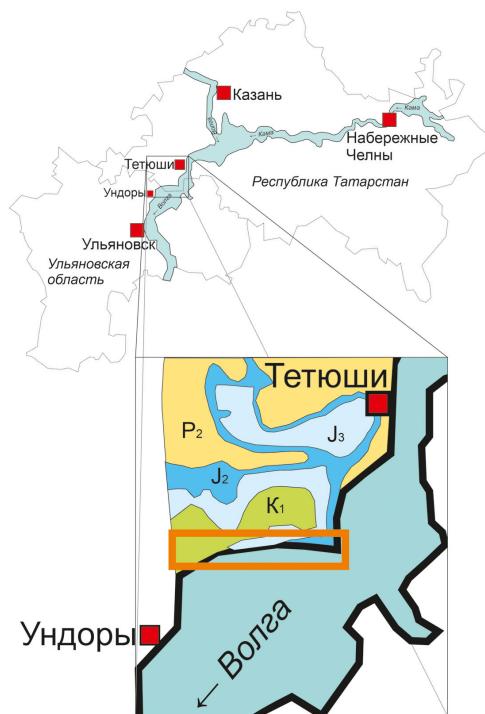
2) Для изучения минерального состава из всех образцов были изготовлены аншлифы, а из 2СР и 3МЛ – шлифы, которые были изучены с помощью поляризационного микроскопа Axio imager A2m (Carl Zeiss, Германия).

3) Дополнительно определялся минеральный состав микрокристаллических минеральных агрегатов при помощи рамановской спектроскопии (рамановский конфокальный микроскоп inVia Qontor (Renishaw, Великобритания), рамановские спектры возбуждались твердотельным Nd:YAG лазером (532 нм, объектив 20×). Полученные спектры идентифицировались с помощью встроенной спектральной базы данных «Renishaw's Inorganic Materials and Minerals spectral database», а также с помощью программного продукта CrystalSleuth, который предоставляет возможность сравнить полученные спектры с базой данных RRUFF. База RRUFF, размещенная в сети Интернет, находится в свободном доступе и содержит полный набор высококачественных спектральных данных по хорошо охарактеризованным минералам (Downs, 2006). Измерения проводились инженером А.Р. Сафиуллиной.

4) Химический состав поверхности аншлифов установлен при помощи рентгенфлуоресцентного анализа с построением элементных карт (микрорентгенофлуоресцентный спектрометр M4 Tornado Bruker, Великобритания, напряжение 50 кВ, сила тока 600 μА, разрешение пикселя 26 мкм). Измерения проводились инженером Р.Н. Музаровым.



Рис. 2. Место сбора образцов (оранжевый прямоугольник)



5) Для детального исследования морфологии и химического состава микрокристаллических минеральных агрегатов из образцов изготавливались свежие сколы, которые изучались с помощью сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии (сканирующий электронный микроскоп Phillips XL-30, оснащенный энергодисперсионным спектрометром ESEM, Нидерланды). Исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, при глубине зондирования в 1 мкм и точности измерений – 0,1–1% (инженер Б.М. Галиуллин).

6) Валовый минеральный состав определен методом рентгенографической дифрактометрии (рентгеновский дифрактометр SHIMADZU XRG-7000S, Япония) из образцов были изготовлены навески порошковых проб (5–10 г). Режим съемки: фильтрованное Cu Кα излучение, скорость съемки 1°/мин, напряжение 40 кВ, сила тока 30 мА. Измерения проводились инженером 1 категории Г.М. Ескиной.

7) Для изучения валового элементного состава применялась масс-спектрометрия (масс-спектрометр с индуктивно связанный плазмой iCAP Qc Thermo Fisher Scientific, США), для измерений из образцов подготавливались навески порошковых проб (100 мг). Оператор – младший научный сотрудник К.Р. Миннебаев.

Все измерения проводились в лабораториях Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета при непосредственном участии авторов.

Дополнительные измерения валового минерального состава для образца 2БГ проведены с применением полуколичественного рентгенофазового анализа, в порошковых пробах (навеска 5–10 г) на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Япония) с использованием программного обеспечения Siroquant. Выбор режима съемки аналогичный вышеупомянутому. Измерения

проводились в Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН младшим научным сотрудником А.Д. Рянской.

Измерения на фотографиях сколов, шлифов, анишлифов проведены с применением программы ImageJ.

## Результаты

### Макроскопическое описание

В результате макроскопических наблюдений полированной и не полированной поверхности позвонков установлен следующий ряд минералов: пирит – содержится в позвоночном канале образца 2СР и 2БГ, в межтрабекулярном пространстве губчатой костной ткани 2СР, 2БГ, 3МЛ, в виде прожилков в трещинах образца 1БГ; карбонаты (сидерит и кальцит) – в межтрабекулярном пространстве губчатой костной ткани и прожилках, реагируют с соляной кислотой; барит – щетка на поверхности позвонка 3 МЛ; желтые охры лимонита – по трещинам в образцах 1БГ и 2БГ, в межтрабекулярном пространстве губчатой костной ткани образца 3 МЛ (рис. 1).

### Оптическая микроскопия

Использование бинокулярного микроскопа позволило рассмотреть формы кристаллов пирита, которые в разных частях позвонка отличаются (рис. 3а–в).

В межтрабекулярном пространстве губчатой костной ткани агрегаты пирита (до 63 мкм) образуют кайму (рис. 3а, б). В некоторых случаях обнаруживаются октаэдры или пентагондодекаэдры пирита, прикрепленные к стенкам трабекул губчатой костной ткани, реже – кубические формы (рис. 3а, б).

На поверхности образцов 2СР и 2БГ агрегаты пирита в позвоночном канале и вне позвоночного канала представляют собой микрокристаллическую массу, в которой иногда различимы кубы {100} со сторонами 100–250 мкм (рис. 3в).

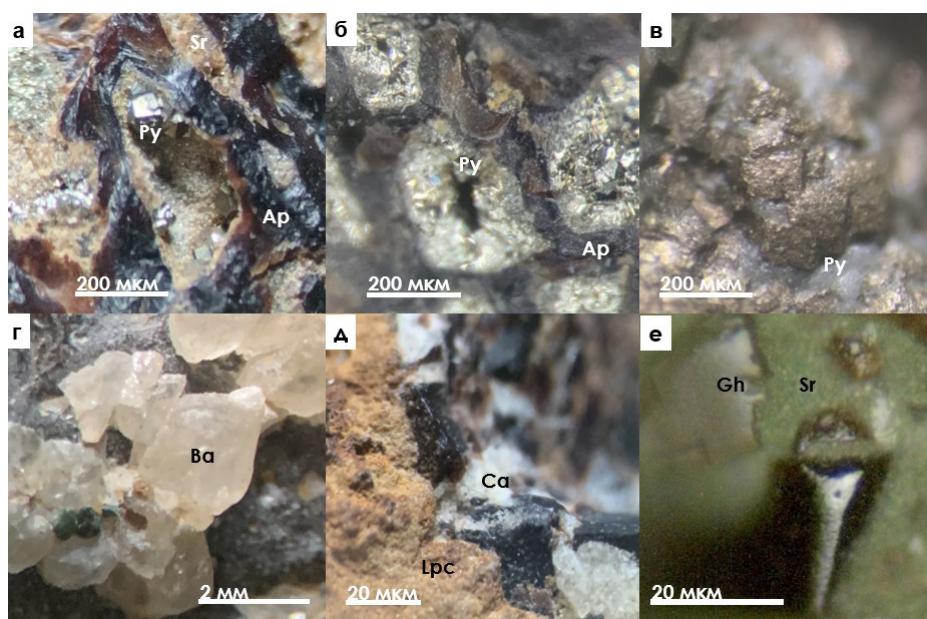


Рис. 3. Минерализация костной ткани позвонков морских рептилий: а–в – скол образца 2СР; г – поверхность образца 3МЛ; д – скол образца 1БГ; е – трещина образца 1БГ. Ру – пирит, Sr – сидерит, Ap – апатит; Lpc – лепидокрокит, Ba – барит, Ca – кальцит, Gh – гетит.

Сидерит заполняет межтрабекулярное пространство губчатой костной ткани неравномерно: наблюдаются участки как полного заполнения, так и образования микрокристаллических агрегатов сидерита в виде щеточек (рис. 3а, е), которые крепятся к стенкам трабекул, образуя, таким образом, неполное заполнение.

Минеральные агрегаты барита (рис. 3г), при увеличении, представлены таблитчатыми кристаллами с гранями до 2 мм.

Гипергенная минерализация представлена микрозернистыми массами лепидокрокита (рис. 3д) и псевдоморфозами гетита по пириту (рис. 3е).

Исследование образцов позвонков в шлифах и аншлифах (рис. 4) при помощи поляризационного микроскопа позволило обнаружить, что угловатые отдельные зерна кварца (50–250 мкм) обнаруживаются не только в пирите

позвоночного канала образца 2СР (Глухов и др., 2023), но и в пирите, заполняющем межтрабекулярное пространство (рис. 4а). Также отмечено, что пирит выполняет не только макроскопические трещины, но и микротрещины окаменевшей костной ткани, которая представлена апатитом (рис. 4а, в). Сидеритом заполнены полости губчатой костной ткани (рис. 4в, г). В шлифе образца 3МЛ в губчатой костной ткани обнаруживаются прозрачные вытянутые кристаллы барита длиной 80–640 мкм.

#### Рамановская спектроскопия

Минеральный состав фрагментов костей, определенный с помощью оптической микроскопии, подтвержден рамановскими спектрами (рис. 5, 6).

Особенности топологии поверхности, в некоторых случаях, обуславливают наличие сложных суперпозиционных спектров. Так, например, на спектрах кварцевых зерен, расположенных в пиритовом матриксе образца 2СР (рис. 5), прослеживаются линии пирита с характерными рамановскими сдвигами 342 и 379  $\text{cm}^{-1}$ , а также на спектрах гетита (рис. 6) в образце 1БГ.

Подтверждено наличие пирита (рис. 5, 6) во всех образцах; гетита и гематита (рис. 6) в образцах 1БГ, 2БГ и 3МЛ; барита (рис. 5) в образце 3МЛ; кальцита (рис. 5) в образце 2БГ и 3МЛ; кварца (рис. 5) в образце 2СР.

#### Рентгенфлуоресцентный анализ (микро-РФА)

Выбор участков для элементного картирования поверхности фрагментов позвонков методом микро-РФА определен необходимостью представления имеющегося разнообразия элементного и минерального состава фосилизированной костной ткани.

Общими результатами для каждого образца являются (рис. 7–10): сходное распределение химических элементов Ca и P, являющихся составными компонентами биоапатита, Ca и P отчетливо повторяют строение костной ткани во всех образцах; распределение Sr в образцах аналогично распределению Ca и P; распределение Mn

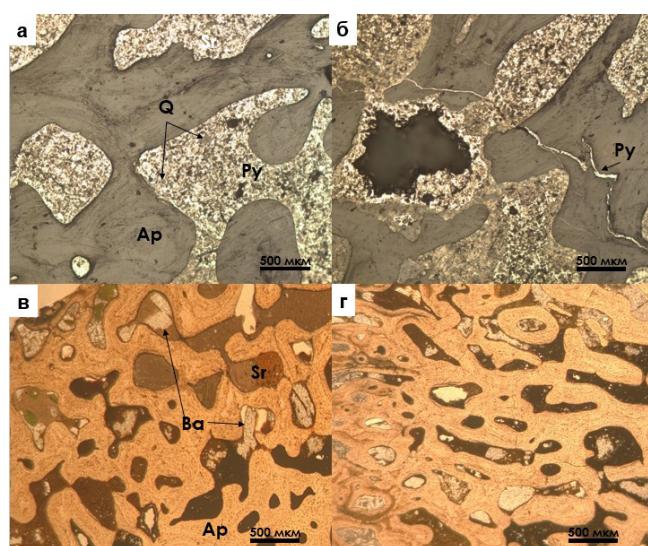


Рис. 4. Минерализация костной ткани позвонков морских рептилий: а, б – аншлиф образца 2СР; в, г – шлиф образца 3МЛ. Q – кварц, Ap – апатит, Py – пирит, Ba – барит, Sr – сидерит.

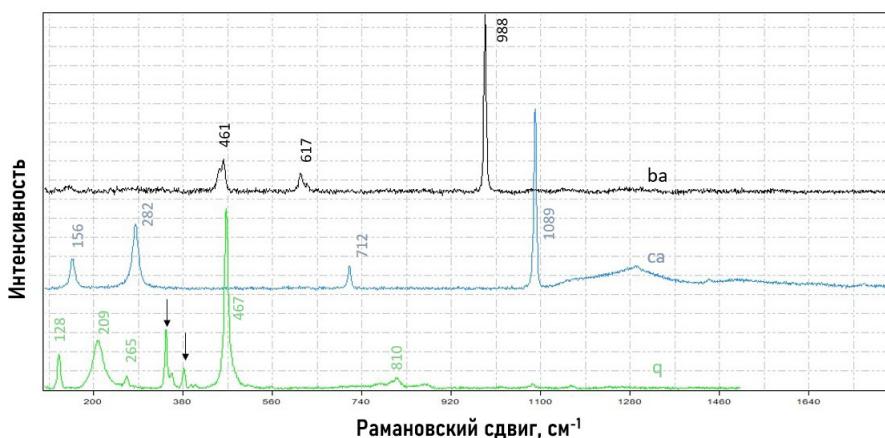


Рис. 5. Рамановские спектры безжелезистых минеральных агрегатов фоссилизированной ткани позвонков морских рептилий: черные стрелки – пики FeS, ba – барит, ca – кальцит, q – кварц

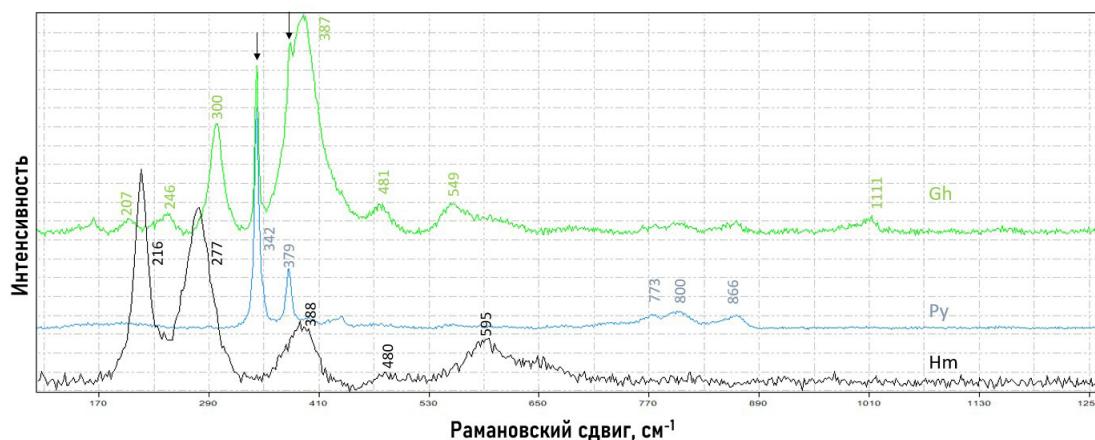


Рис. 6. Рамановские спектры железистых минеральных агрегатов фоссилизированной ткани позвонков морских рептилий: черные стрелки – пики FeS, Gh – гетит, Py – пирит, Hm – гематит

имеет сходимость с распределением Ca, в пределах карбонатных фаз, имея также небольшую сходимость с Fe; S и Fe приурочены к губчатой костной ткани и трещинам; Si, K и Al имеют сходное распределение и представляют собой глинистую компоненту. С последней в образцах 1БГ и 2БГ связано распределение Ti и Ce.

В образцах 2БГ и 2СР наблюдается накопление Y: в образце 2СР (рис. 7) – на контакте костной ткани (справа) с каналом в остистом отростке позвонка (слева округлой формы), полностью заполненном пиритом; в образце 2БГ (рис. 8) Y связан только с костной тканью в его пиритизированной части и равномерно распределен по его кальцитизированной части.

Mg имеет неравномерное распределение в образцах 1БГ и 3МЛ и равномерное в образце 2БГ. На неравномерно распределен в образце 2СР, равномерно в образце 2БГ. Наложение Na на Al и Si может свидетельствовать о наличии плагиоклазов (альбита).

#### Сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионная спектроскопия (СЭМ и ЭДС)

Наиболее распространенные минеральные фазы, встречающиеся в образцах: апатит и пирит (рис. 11а). Пиритовые корочки частично или полностью покрывают поверхность костной ткани. Корочки имеют разную мощность, в вогнутых участках кости их мощность максимальна, в выпуклых и заостренных минимальна.

В целом, в ископаемом состоянии костная ткань сохраняет особенности внутренней морфологии – хорошо просматриваются различно-ориентированные пластины: концентрические, формирующие остеоны с лакунами остеоцитов, и интерстициальные, заполняющие пространство между остеонами (рис. 11б). Остеоны представлены в виде налагающихся друг на друга параллельно-вытянутых концентрических костных пластинок, состоящих из фтор-гидроксилапатитовых минеральных образований. Губчатая костная ткань сформирована рыхло расположеннымными костными трабекулами, образующими сложно-ячеистый вид межтрабекулярного пространства и костной ткани. Костная ткань трабекулы и заполненное вокруг неё межтрабекулярное пространство, представлены на рис. 11б. Спектр губчатой костной ткани (спектр 1) показывает, что она составлена фтор-гидроксилапатитом (табл. 1). Губчатая костная ткань состоит, в большей степени, именно из этого минерала (до 90% от общей массы). Спектр вещества (спектр 2), заполнившего межтрабекулярное пространство, также представлен фтор-гидроксилапатитом.

В гаверсовых каналах остеонов, межкостном пространстве и в лакунах остеоцитов обнаружены многочисленные скопления образований коккоидной и палочко-видно-ветвящейся формы, предположительно биогенной природы (Розанов, 2011; Розанов, 2002), в частности, представители серобактерий (коккоидные формы) (рис. 11в, г).

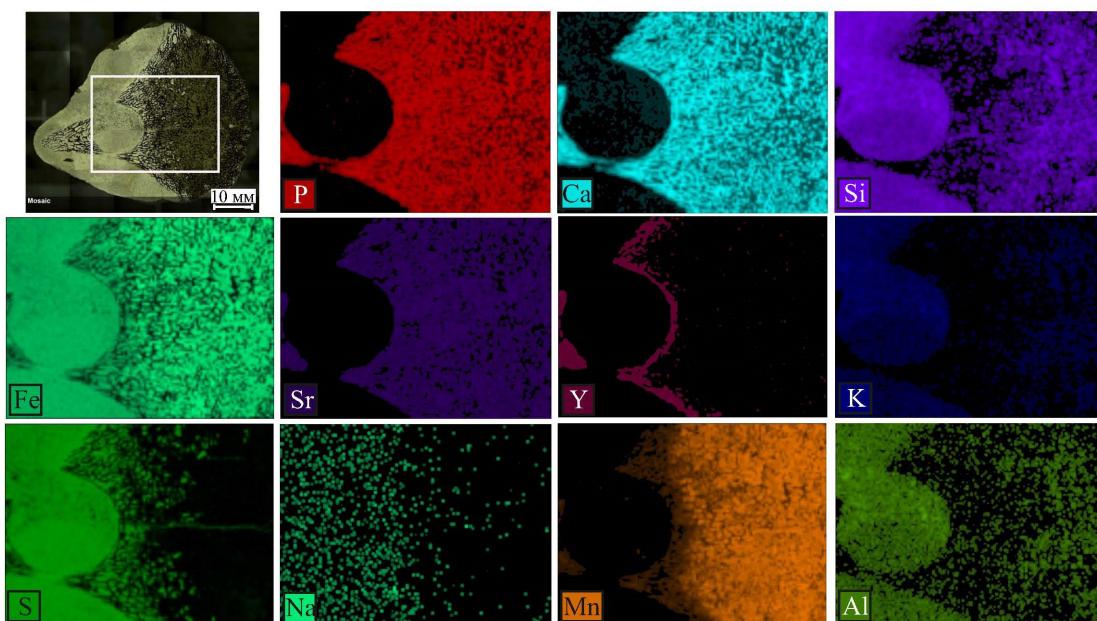


Рис. 7. Карта распределения элементов по ископаемому позвонку, образец 2CP

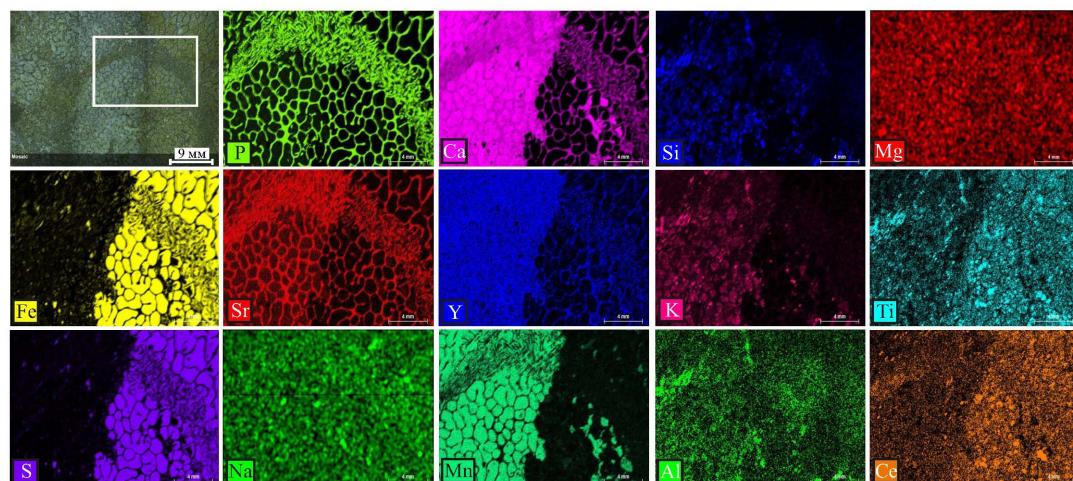


Рис. 8. Карта распределения элементов по ископаемому позвонку, образец 2БГ

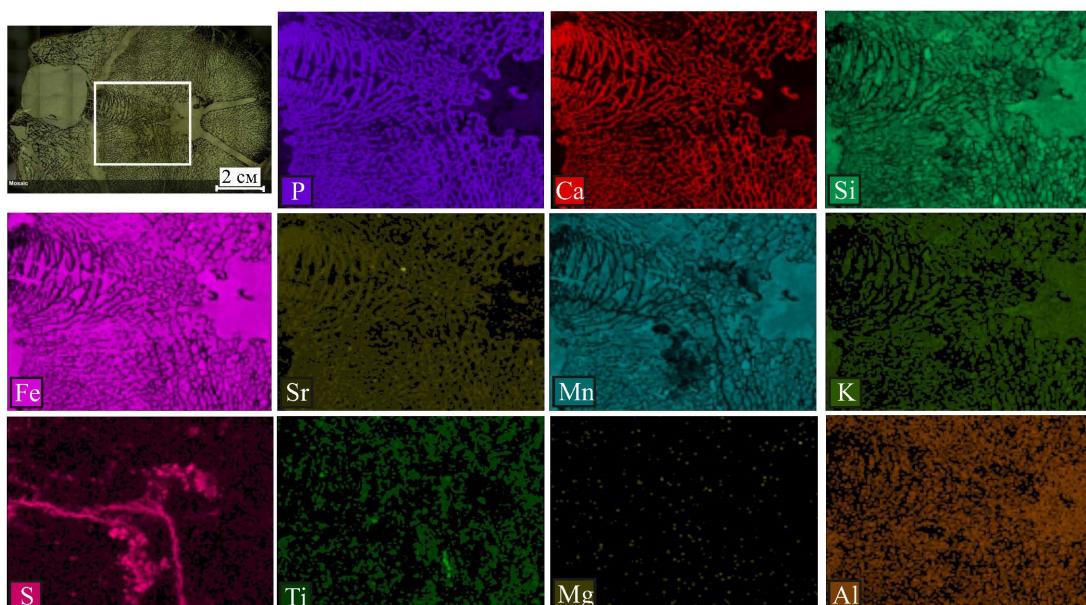


Рис. 9. Карта распределения элементов по ископаемому позвонку, образец 1БГ

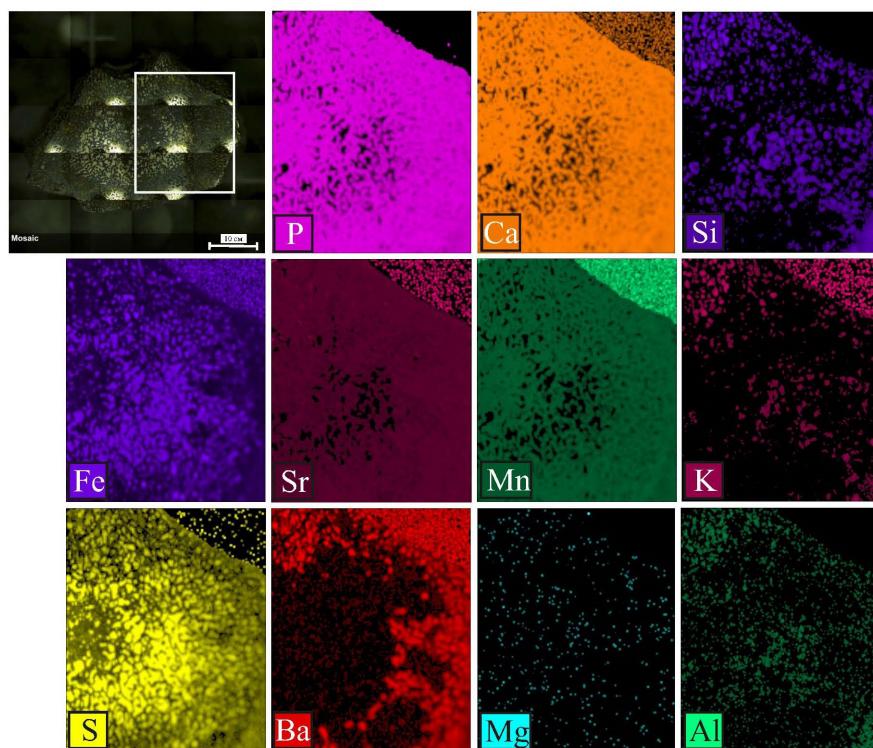


Рис. 10. Карта распределения элементов по ископаемому позвонку, образец 3МЛ

Помимо бактерий обнаружены корродированные кубические кристаллы пирита, покрытые окислами и гидроокислами железа (рис. 11д, табл. 1).

На изогнутых поверхностях губчатой костной ткани в межтрабекулярном пространстве и реже в полостях гаверсовых каналов наблюдаются кристаллы гипса (рис. 11е, табл. 1), представленные тонкими пластинками.

Исходя из данных энергодисперсионного анализа, представленных в табл. 1, основные минералы, встречающиеся в пустотах (межкостном пространстве) исследуемых образцов, – пирит, гипс, оксиды и гидроксиды железа.

#### Рентгенографическая дифрактометрия (РДА)

По результатам полуколичественного рентгенофазового анализа установлено, что образцы представлены следующими минеральными фазами (табл. 2): пирит, кварц, апатит, сидерит, кальцит, ангидрит, альбит. Преобладающее значение имеют пирит, апатит и кварц, встречающиеся в каждом образце. Карбонаты (сидерит и кальцит) имеют преобладающее значение для образцов 1БГ и 2БГ.

#### Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS)

В составе исследованных образцов определены следующие элементы: Li, Be, B, Na, Mg, Al, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U.

Результаты распределения содержания РЗЭ в костных остатках представлены на рис. 12. Содержания последних нормированы на RPSC (генеральная проба глин Русской платформы). Значения содержаний РЗЭ в образцах выше, чем в RPSC. Преобладают средние и тяжелые РЗЭ.

Для уточнения палеогеографических условий рассчитана величина цериевой аномалии в образцах. Согласно

полученным данным, в исследованных пробах фиксируется положительная Се-аномалия, значения которой варьируют от 1,25 до 1,42 (Иванова, 2019; Дуб, Мизенс, 2023).

Обращают внимание значения содержания урана в пробах костных остатков, которые варьируют от 4 до 25 г/т.

#### Обсуждение результатов

Результаты минералогического исследования показали, что состав образцов весьма разнообразен и представляет следующий набор аутигенных и гипергенных минералов: фтор-гидроксилапатит, пирит, барит, гипс, ангидрит, сидерит, кальцит, гематит, гетит, лепидокрокит, кварц и альбит.

Такое разнообразие обусловлено механизмами минерализации и изменениями среды, в которой происходил процесс фоссилизации костных останков.

В ходе проведенных исследований (Гайнанова, Шиловский, 2022; Глухов и др., 2023) установлена следующая стадийность минералообразования в костной ткани позвонков морских рептилий.

На стадии раннего диагенеза в господствующей восстановительной обстановке образовывались пирит, барит, гипс, сидерит и кальцит. В это же время происходили изоморфные замещения Са в костном материале (Наумов, 1989; Королев и др., 2010; Николаев, 2017). По мнению ряда исследователей (Королев и др., 2010; Гайнанова, Шиловский, 2022; Глухов и др., 2023), восстановительная обстановка может быть вызвана деятельностью сульфатредуцирующих бактерий или разгрузкой сипов (низкотемпературных сероводородных флюидов). Изученная внутренняя морфология костной ткани позвонков показала наличие коккоидной бактериальной фауны, представленной, предположительно, группой прокариотов – серобактериями (тиобактериями), одноклеточными

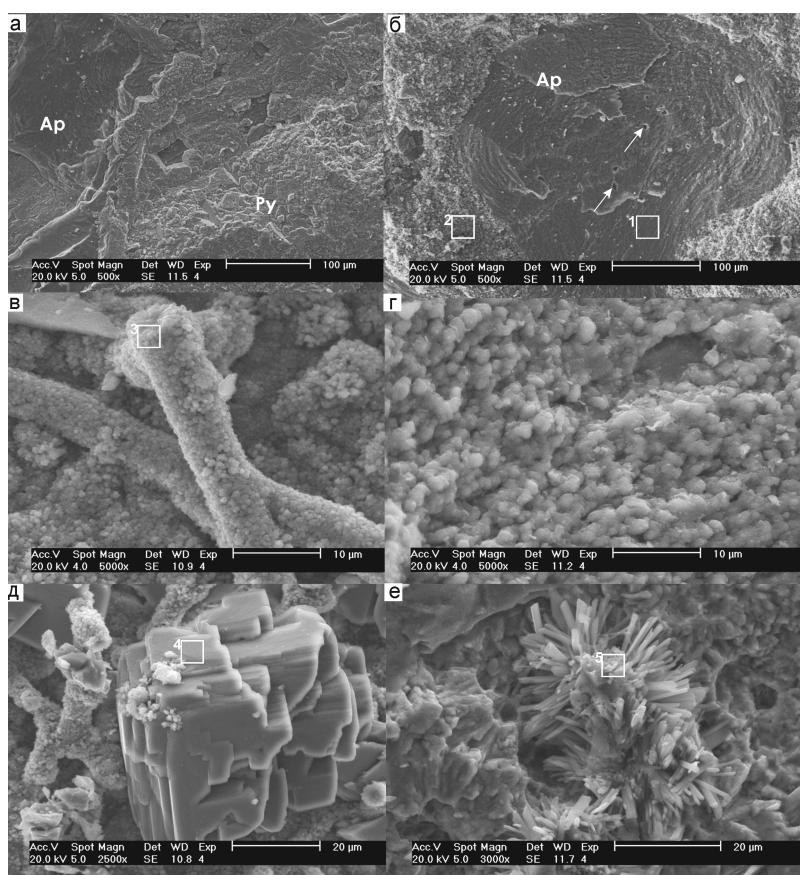


Рис. 11. Электронные изображения структуры костной ткани: а) пиритовая корочка на подстилающей ее костной ткани (обр. 2СР); б) фото трабекулы крупным планом с лакунами остеоцитов (белые стрелки) (обр. 2СР); в) биоморфные структуры из оксидов железа по, предположительно, бактериями трубчатой и коккоидной формы (обр. 3МЛ); г) те же биоморфные структуры по бактериям коккоидной формы крупным планом (обр. 2СР); д) корродированный кристалл пирита (обр. 1БГ); е) кристаллы гипса на поверхности костной ткани (обр. 3МЛ). Ар – апатит, Ру – пирит.

Обр.	Спектр	O	F	P	S	Ca	Mn	Cl	Fe
2СР	1	29,28	1,89	18,79	-	48,33	1,52	0,19	-
2СР	2	52,74	6,60	12,72	-	26,30	0,38	0,38	0,88
3МЛ	3	54,31	-	-	-	-	-	-	45,69
3МЛ	5	65,58	-	-	14,83	19,59	-	-	-
3МЛ	8	-	-	-	52,80	-	-	-	47,20
1БГ	4	50,90	-	-	-	-	-	-	49,10
1БГ	12	54,87	8,55	12,07	-	24,51	-	-	-

Табл. 1. Химический состав (мас. %) ископаемых остатков позвонков морских рептилий. Прочерк – не обнаружено.

организмами, которые получают энергию для синтеза органических веществ путем окисления сероводорода (Розанов, 2011; Розанов, 2002).

Разнообразие форм пиритовых кристаллов определено характером диффузионного обмена между кристаллизационным (или коллоидным) раствором, заполняющим биопустоты, и окружающей средой илистого осадка (Королев и др., 2010). Сульфаты образовались из исходно аморфной фазы, обогащенной фосфором (Леин, Кравчишина, 2020), которая связывает барий и кальций морской воды. В данном случае барий образует высококонцентрированные локальные участки на поверхности и в губчатой ткани кости образца, которая изначально составлена биоапатитом. Гипс образует редкие кристаллические агрегаты на поверхности костной ткани, которые расположены

в пустотах. Господствовавшая восстановительная обстановка также благоприятно влияла на образование кальцита (Наумов, 1989).

Варьирующие содержания макропримесей Mn в сидерите во всех образцах (Гайнанова, Шиловский, 2022; Глухов и др., 2023) указывают на процесс родохрозитизации (Мальков и др., 2004). Из распределения марганца на элементных картах видно, что он также хорошо сопоставим с распределением кальция. Это связано с реакциями замещения марганцем кальция в структуре фтор-гидроксилапатита.

Существует мнение (Мальков и др., 2004), что источником Mn в водах Среднерусского моря были сиаллитные коры выветривания. Таким образом, можно предположить, что в процессе их выветривания окислительные условия

Обр.	Массовая доля минеральной фазы, %						
	Пирит	Кварц	Апатит	Сидерит	Кальцит	Ангидрит	Альбит
1БГ	13	7	34	46	—	—	—
2БГ	10,7	2,8	33,1	—	53,4	—	—
2СР	47	37	5	1	—	—	10
3МЛ	51	16	24	—	—	9	—

Табл. 2. Минеральный состав (мас. %) ископаемых остатков позвонков морских рептилий. Прочерк – не обнаружено.

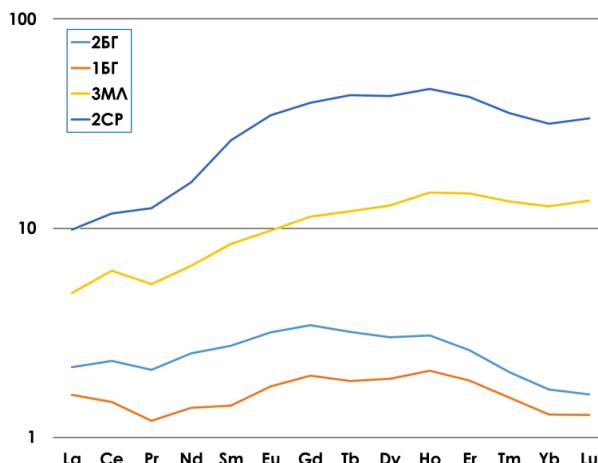


Рис. 12. Нормированные на RPSC (проба глин Русской платформы) спектры распределения РЗЭ в образцах ископаемых остатков позвонков морских рептилий

привели к образованию оксидов железа и марганца, которые под воздействием поверхностных вод мигрировали на дно Среднерусского моря, а последующие восстановительные условия в иловом осадке привели к растворению Fe и Mn-оксидов и высвобождению редкоземельных элементов (Иванова, 2019).

Вещество костной ткани выступало активным сорбентом из природных морских и иловых вод с растворенными в них U, Sr, Y и РЗЭ. По мнению исследователей (Мальков и др., 2004; Иванова, 2019), в аноксидной среде диагенеза мог формироваться уранинит, а Sr и РЗЭ накапливались в окислительной обстановке. Напротив, известно, что минеральный состав указывает на восстановительные условия (Наумов, 1989; Глухов и др., 2023), а наличие положительной цериевой аномалии – на аноксидную среду (Дуб, Мизенс, 2023). Можно предположить, что накопление Sr и Y (Гайнанова, Шиловский, 2022; Глухов и др., 2023) в костной ткани происходило позднее процесса пиритизации. Исследования (Дубинин, 2004) РЗЭ в осадках иловых вод прибрежных районов заливов показывают, что колебания содержаний РЗЭ связаны с колебаниями содержаний железа в иловой воде. Так, восстановительная среда в осадках способствует возрастанию содержания церия и легких РЗЭ. Увеличение содержания церия связано с его восстановлением и переходом в иловую воду из твердых фаз осадков. Наличие положительной цериевой аномалии указывает на прибрежно-морскую обстановку осадконакопления (Gabova, Kravchenko, 2016). Здесь важно отметить, что спектры РЗЭ костей из прибрежно-морских обстановок с относительно высокими скоростями осадконакопления отражают состав источника сноса и состав воды во время осаждения частиц.

Ввиду отсутствия геологической информации об источниках гидротерм в пределах исследуемой площади предполагается, что основная масса РЗЭ поставлялась реками в виде взвеси. Основными движущими силами переноса и накопления терригенного материала костеносных пластов являлись приливно-отливные течения и волнение моря в обстановке побережья (Gabova, Kravchenko, 2016). Источником Y могли быть сипы – выходы низкотемпературных сероводородных флюидов, обнаруженные в среднеуральских отложениях окраины Ульяновско-Саратовского прогиба (Николаева и др., 2014).

Таким образом, I) накопление РЗЭ ограничивается ранним диагенезом и прекращается, когда поры в костном материале заполняются диагенетическими минералами, что приводит к замедлению диффузии и ослаблению взаимодействия с поровыми водами (Иванова, 2019; Глухов и др., 2023).

II) На стадии позднего диагенеза произошло образование сидерита, кварца и халцедона (Глухов и др., 2023), для формирования которых характерно наличие восстановительной и слабовосстановительной обстановки (Наумов, 1989).

III) На стадии катагенеза происходит альбитизация (Предтеченская, Злобина, 2022; Наумов, 1989). Образование ангидрита связано главным образом с замещением первичного седиментационного и диагенетического гипса (Наумов, 1989). О проявлении катагенеза в верхнеуральских отложениях также свидетельствуют битуминозные глины и горючие сланцы, слагающие толщу, распространенную во всех прилегающих к Ульяновско-Саратовскому прогибу впадинах (Зорина, 2003).

IV) В процессе эпигенеза (зона гипергенеза) в окислительной обстановке под влиянием современных процессов в костных остатках образовались псевдоморфозы гидроокислов железа по сульфиду железа и микрозернистой массы окислов железа. Разрушение пирита сопровождается высвобождением сульфат-ионов, которые также могли способствовать образованию микрокристаллов гипса.

Известно, что кроме фоссилизированных костных остатков в верхнеуральских оксфорд-киммериджских отложениях встречаются пиритовые конкреции, содержащие РЗЭ в составе монацитов (Гайнанова и др., 2024). Последние распространены на участке сбора в количестве от 20 до 80 штук на 1 м<sup>2</sup>. Это обращает внимание на необходимость проведения дальнейших исследовательских и оценочных работ. Верхнеуральские отложения, занимая весьма обширные площади в центральной и северной частях Восточно-Европейской платформы, являются перспективными в контексте изучения распространенности в них уникальных скоплений фоссилизированных

останков и седиментационных форм (конкремций) с их богатым минеральным и элементным составом.

## Заключение

Подводя итоги проведенному исследованию можно констатировать следующее.

1) Осадконакопление происходило в аноксидальной прибрежно-морской обстановке, где основными движущими силами переноса и накопления терригенного материала костеносных пластов являлись приливно-отливные течения и волнение моря в обстановке побережья.

2) Состав фоссилизированной костной ткани позвонков морских ящеров представлен набором аутигенных минералов, сформировавшихся на стадиях раннего и позднего диагенеза, катагенеза и эпигенеза.

3) На ранних стадиях диагенеза происходили периодические смены окислительно-восстановительных обстановок, ведущим механизмом минерализации являлся биогенный.

4) На стадиях позднего диагенеза, катагенеза и эпигенеза преобладающим механизмом минерализации является хемогенный, протекающий путем синтеза сульфидов железа из раствора.

5) Морфология и характер фоссилизации изученных образцов позвонков показали связь со структурно-анатомическими особенностями строения костной ткани. Наличие компактной костной ткани и степень её сохранности не сильно влияет на изоморфные замещения Ca в костном веществе, а также на диффузионный обмен между коллоидными растворами окружающей среды илистого осадка и межтрабекулярного пространства губчатой костной ткани. Комплекс аутигенных минералов, стадийность их хемогенного и биогенного образования указывают на определенную степень проницаемости костного вещества, активно участвующего как в ионном обмене кристаллизационных растворов, так и выступавшего сорбентом для ряда редкоземельных элементов.

6) Основным источником терригенного материала в водах Среднерусского моря являлись сиаллитные коры выветривания, источником Y могли быть сипы.

7) Продолжение исследований уникальных костеносных толщ верхнеюрских отложений представляет перспективу в решении вопросов палеореконструкций геологического прошлого и рассмотрении этих отложений как экзотических стратиформных ураново-редкометальных месторождений.

## Финансирование/Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания № Гос. учета НИОКТР 123011800011-2 «Рудообразующие процессы и закономерности размещения месторождений полезных ископаемых во внутриплитных коллизионно-складчатых поясах».

Авторы выражают благодарность инженерам А.Р. Сафиуллиной, Р.Н. Музарову, Б.М. Галиуллину, Г.М. Ескиной, младшим научным сотрудникам К.Р. Миннебаеву, А.Д. Рянской за аналитические исследования образцов, а также научному сотруднику Е.А. Панкрушиной за помощь в интерпретации результатов.

## Литература

Гайнанова А.Р., Шиловский О.П. (2022). Геохимические особенности фоссилизации костной ткани позвонков морских рептилий из верхнеюрских отложений Республики Татарстан. *Металлогенез древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений*. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, с. 207–212.

Гайнанова А.Р., Шиловский О.П., Глухов М.С. (2024). Исследование РЭ минералов в пиритовых конкрециях методом СЭМ. *Металлогенез древних и современных океанов-2024. Рудогенез*. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, с. 230–232.

Глухов М.С., Шиловский О.П., Муллакаев А.И. (2023). Особенности диагенетического минералообразования в костной ткани позвонков морских рептилий из верхнеюрских отложений Республики Татарстан. *Металлогенез древних и современных океанов-2023. Минералогия и геохимия рудных месторождений: от теории к практике*. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, с. 209–213.

Дуб С.А., Мизенс Г.А. (2023). Геохимия редкоземельных элементов и цериевая аномалия в морских осадочных карбонатах: современные представления. *Вестник геонаук*, 11(347), с. 3–17. <https://doi.org/10.19110/geom.2023.11.1>

Дубинин А.В. (2004). Геохимия редкоземельных элементов в океане. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора химических наук. Москва: Институт океангеологии им. П.П. Ширшова РАН, 60 с.

Зорина С.О. (2003). Мезозой северо-востока Ульяновско-Саратовского прогиба. Автореферат диссертации на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук. Казань: Казанский государственный университет, 24 с.

Иванова В.В. (2019). Геохимические особенности спектров редкоземельных элементов в отложениях Восточной Сибири как новый индикатор изменения климата позднего плейстоцена в зоне перигляциального литогенеза. *Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук*. Санкт-Петербург: ФГБУ ВНИИОкеангеология, 492 с.

Королев Э.А., Шиловский О.П., Бариева Э.Р., Нуждин Е.В., Николаева В.М., Хамадиев Р.И. (2010). Влияние структурно-генетических особенностей различных органических остатков на характер образования аутигенных пиритовых агрегатов в верхнеюрских отложениях. *Ученые записки Казанского университета*, 152(3), с. 192–207.

Костылева В.В., Митта В.В. (2011). Стратиграфия и обстановки осадконакопления средней юры урочища Тархановская пристань, Татарстан. *Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. Четвертое Всерос. совещ.*: Науч. материалы. Санкт-Петербург: ООО «Издательство ЛЕМА», с. 117–118.

Кудрявцева А.И., Кудрявцев В.И. (2003). Минеральный состав фоссилий динозавров местонахождения Калбак-Кыры (Тува). *Палеонтологический журнал*, 4, с. 96–102.

Леин А.Ю., Кравчишина М.Д. (2021). Геохимический цикл бария в океане. *Литология и полезные ископаемые*, 4, с. 293–310.

Малёнкина С.Ю. (2017). Уникальные верхнеюрские фосфатные строматолиты Южного Приуралья как объект научного туризма и экскурсий. *Материалы Пятой Всероссийской конференции. Посвящается 65-летию Крымской учебной практики по геологическому картированию Ленинградского-Санкт-Петербургского государственного университета*. Под редакцией В.В. Аркадьева. Санкт-Петербург: Издательство ВВМ, с. 230–232.

Мальков Б.А., Лысюк А.Ю., Иванова Т.И. (2004). Минеральный состав и микроэлементы окаменелых костей морских ящеров местонахождения Каргорт (Республика Коми). *Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН*, 1, с. 12–15.

Митта В.В., Костылева В.В., Глинских Л.А., Шурыгин Б.Н., Стародубцева И.А. (2014). Стратиграфия Средней Юры юго-запада Республики Татарстан. Стратиграфия. *Геологическая корреляция*, 1, с. 31–46.

Наумов В.А. (1989). Оптическое определение компонентов осадочных пород. Справочное пособие. М.: Недра, 349 с.

Николаев А.М. (2017). Изоморфизм, условия образования и свойства биогенного апатита и ассоциирующих с ним ортофосфатов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 141 с.

Николаева В.М., Шиловский О.П., Королев Э.А. (2014). Морфологические особенности пиритовых конкреций среднеюрских

отложений Среднерусского моря как отражение просачиваний сероводородных флюидов. *Металлогенез древних и современных океанов-2014. Двадцать лет на передовых рубежах геологии месторождений полезных ископаемых*. Миасс: ИМиН УрО РАН, с. 76–78.

Предтеченская Е.А. Злобина О.Н. (2022). Об усовершенствовании схемы катагенеза нижне-среднеюрских отложений Уренгойского нефтегазоносного района на основе минеральных и структурных индикаторов. *Нефтегазовая геология*, 2, Сериальное издание: Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, с. 24–47.

Розанов А.Ю. (2002). Бактериальная палеонтология. Москва: ПИН РАН, 188 с.

Розанов А.Ю. (2011). Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. Атлас фотографий. Москва: ПИН РАН, 172 с.

Савельева О.П., Савельев Д.П., Философова Т.М. (2019). Накопление урана и иттрия костным детритом в углеродистых породах п-ова Камчатский мыс. *Вестник КРАУНЦ. Науки О Земле*, 2(42), с. 77–83.

Тюленева В.М., Быстров И.Г., Расулова С.Д., Каминов Б.Ю. (2014). Особенности комплексных органо-фосфатных руд в Ергенинском районе Калмыкии. *Разведка и охрана недр*, 7, с. 6–12.

Чернышов Н.М., Шарков А.А., Молотков С.П. (2012). Сравнительная характеристика верхнеолигоценовых ураново-редкометалльных органогенно-фосфатных месторождений Мангышлака и верхнедевонского однотипного оруднения в кровле Михайловского месторождения КМА. *Регион: системы, экономика, управление*, 1(16), с. 42–54.

Шарков А.А. (2015). Геологический феномен ураново-редкометалльных месторождений. *Природа*, 2, с. 21–30.

Шарков А.А. (2014). Закономерности распределения основных компонентов в рудных залежах ураново-редкометалльных месторождений Восточного Паратетиса. *Разведка и охрана недр*, 11, 7–12.

Шарков А.А. (2002). Уникальные месторождения урана. *Природа*, 3, с. 3–12.

Шатров В.А., Войцеховский Г.В. (2009). Применение лантаноидов для реконструкций обстановок осадкообразования в фанерозое и протерозое (на примере разрезов чехла и фундамента восточно-европейской платформы). *Геохимия*, 8, с. 805–824.

Шиловский О.П., Хасанов Р.Р. (2020). Геохимические особенности псевдоморфоз пирита по растительным остаткам из верхнеюрских отложений Республики Татарстан. *Металлогенез древних и современных океанов-2020. Критические металлы в рудообразующих системах*. Миасс: ЮУ ФНЦ МИГ УрО РАН, с. 228–231.

Downs R.T. (2006). The RRUFF Project: an integrated study of the chemistry, crystallography, Raman and infrared spectroscopy of minerals. *Proceedings of the 19th general meeting of the IMA*, Kobe, Japan, 3–13.

Gabova K.V., Kravchenko G.G. (2016). Geochemistry of impurity elements of upper jurassic deposits of Kazan fields group. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 15(19), pp. 105–113. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2016.19.1>

## Сведения об авторах

**Михаил Сергеевич Глухов** – кандидат геол.-минерал. наук, научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заваричного УрО РАН; доцент кафедры региональной геологии и полезных ископаемых Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет; доцент кафедры геологии и гидрометеорологии, Самаркандинский государственный университет

Россия, 620110, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, д. 15

e-mail: Gluhov@igg.uran.ru

**Олег Павлович Шиловский** – кандидат геол.-минерал. наук, доцент кафедры региональной геологии и полезных ископаемых Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5

e-mail: biarmiceras@gmail.com

**Алина Рустамовна Гайнанова** – инженер, Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть»

Россия, 423462, Альметьевск, ул. Советская, д. 216

**Алмаз Ильясович Муллакаев** – старший преподаватель кафедры региональной геологии и полезных ископаемых Института геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5

e-mail: almazmullakaev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22.08.2024;  
Принята к публикации 21.01.2025; Опубликована 30.03.2025

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

## Features of Authigenic Mineralization and Geochemical Processes of Fossilization of Marine Reptile Vertebrae (Oxford-Kimmeridge, Republic of Tatarstan)

**M.S. Glukhov<sup>1,2,3\*</sup>, O.P. Shilovsky<sup>2</sup>, A.R. Gainanova<sup>2,4</sup>, A.I. Mullakaev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

<sup>3</sup>Samarkand State University named after Sharof Rashidov, Samarkand, Uzbekistan

<sup>4</sup>TatNIPIneft Tatneft PJSC, Almetьевск, Russian Federation

\*Corresponding author: Mikhail S. Glukhov, e-mail: Gluhov@igg.uran.ru

**Abstract.** Studies were conducted on the sequence and conditions of authigenic mineral formation in fossil bone tissue, as well as the chemical composition and geochemical characteristics of fossilization processes in marine reptile vertebrae discovered in undivided Upper Jurassic clay deposits on the right bank of the Volga River (Tetyushsky District, Republic of Tatarstan). Using a combination of optical microscopy, electron microscopy, and spectral methods, the

following set of authigenic minerals composing the fossilized remains was identified: fluor-hydroxyapatite, pyrite, barite, gypsum, anhydrite, siderite, calcite, hematite, goethite, lepidocrocite, quartz, and albite.

The morphology, structural-anatomical features, mineral composition, and trace element content of the fossilized vertebrae indicate that sedimentation occurred under anoxic conditions on the floor of the Middle Russian Sea.

Mineralization mechanisms included both biogenic (activity of sulfate-reducing bacteria) and chemogenic processes (seep-related activity), with the latter predominating. The sequence of mineral formation stages encompassed early and late diagenesis, catagenesis, and epigenesis (hypergenesis zone).

Positive Ce anomalies (1.25–1.42) suggest a coastal-marine sedimentary environment in the Middle Russian Sea. The determined concentrations of rare earth elements and uranium are highly promising for further evaluation studies of bone-bearing deposits in the Oxfordian-Kimmeridgian clay formation.

**Keywords:** marine reptiles, Oxford-Kimmeridgian clay formation, authigenic mineralization, sulfides, sulfates, carbonates, rare earth elements, uranium

### Acknowledgements

The authors express their gratitude to engineers A.R. Safiullina, R.N. Muzaferov, B.M. Galiullin, G. M. Eskina, junior researchers K.R. Minnebaev, A.D. Ryanskaya for analytical studies of samples, as well as researcher E.A. Pankrushina for assistance in interpreting the results.

The work was performed within the framework of the State Task No. 123011800011-2 R&D State Accounting “Ore-forming processes and patterns of mineral deposits placement in intraplate collision-folded belts”.

**Recommended citation:** Glukhov M.S., Shilovsky O.P., Gainanova A.R., Mullakaev A.I. (2025). Features of Authigenic Mineralization and Geochemical Processes of Fossilization of Marine Reptile Vertebrae (Oxford-Kimmeridge, Republic of Tatarstan). *Georesursy = Georesources*, 27(1), pp. 101–113. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.4>

### References

- Gabova K.V., Kravchenko G.G. (2016). Geochemistry of impurity elements of upper jurassic deposits of Kazan fields group. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 15(19), pp. 105–113. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2016.19.1>
- Gainanova A.R., Shilovsky O.P. (2022). Geochemical features of fossilization of bone tissue of vertebrae of marine reptiles from the Upper Jurassic deposits of the Republic of Tatarstan. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2022. From the material composition to the models and forecasting of deposits*. Miass: YUU FNC MiG UrO RAS, pp. 207–212. (In Russ.)
- Gainanova A.R., Shilovsky O.P., Glukhov M.S. (2024). SEM study of REE minerals in pyrite nodules. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2024. Ore genesis*. Miass: YUU FNC MiG UrO RAS, pp. 230–232. (In Russ.)
- Glukhov M.S., Shilovsky O.P., Mullakaev A.I. (2023). Features of diagenetic mineral formation in the bone tissue of vertebrae of marine reptiles from the Upper Jurassic deposits of the Republic of Tatarstan. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2023. Mineralogy and geochemistry of ore deposits: from theory to practice*. Miass: YUU FNC MiG UrO RAS, pp. 209–213. (In Russ.)
- Downs R.T. (2006). The RRUFF Project: an integrated study of the chemistry, crystallography, Raman and infrared spectroscopy of minerals. *Proceedings of the 19th general meeting of the IMA, Kobe, Japan*, 3–13.
- Dub S.A., Misens G.A. (2023). Geochemistry of rare earth elements and cerium anomaly in marine sedimentary carbonates: modern concepts. *Vestnik geonauk*, 11(347), pp. 3–17. <https://doi.org/10.19110/geov.2023.11.1>
- Dubinin A.V. (2004). Geochemistry of rare earth elements in the ocean. Dr. Chem. Sci. Diss. Abstract. Moscow: P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, 60 p. (In Russ.)
- Ivanova V.V. (2019). Geochemical features of the spectra of rare earth elements in the sediments of Eastern Siberia as a new indicator of late Pleistocene climate change in the zone of periglacial lithogenesis. Dr. Geol. and Min. Sci. Diss. St. Petersburg: FGBI VNII Okeangeologiya, 492 p. (In Russ.)
- Korolev E.A., Shilovsky O.P., Barieva E.R., Nuzhdin E.V., Nikolaeva V.M., Khamadiev R.I. (2010). The influence of structural and genetic features of various organic residues on the formation of autogenic pyrite aggregates in Upper Jurassic sediments. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta*, 152(3), pp. 192–207. (In Russ.)
- Kostyleva V.V., Mitta V.V. (2011). Stratigraphy and sedimentation conditions of the Middle Jurassic tract Tarkhanovskaya pier, Tatarstan. *The Jurassic system of Russia: problems of stratigraphy and paleogeography: Proc. 4th All-Russian. confer.* St. Petersburg: LEM Publishing House, pp. 117–118. (In Russ.)
- Kudryavtseva A.I., Kudryavtsev V.I. (2003). Mineral composition of dinosaur fossils of the Kalbak-Kyry locality (Tuva). *Paleontological Journal*, 4, pp. 96–102. (In Russ.)
- Lein A.Yu., Kravchishina M.D. (2021). The geochemical cycle of barium in the ocean. *Lithology and Minerals*, 4, pp. 293–310. (In Russ.)
- Malenkina S.Yu. (2017). Unique Upper Jurassic phosphate stromatolites of the Southern Urals as an object of scientific tourism and excursions. *Proc. Fifth All-Russian Conference. Dedicated to the 65th anniversary of the Crimean educational practice in geological mapping of Leningrad-St. Petersburg State University*. Edited by V.V. Arkadiev. St. Petersburg, pp. 230–232. (In Russ.)
- Malkov B.A., Lysyuk A.Yu., Ivanova T.I. (2004). Mineral composition and trace elements of fossilized bones of marine lizards located in Kargot (Komi Republic). *Bulletin of the Institute of Geology of Komi NC UrO RAS*, 1, pp. 12–15. (In Russ.)
- Mitta V.V., Kostyleva V.V., Glinskikh L. A., Shurygin B. N., Starodubtseva I. A. (2014). Stratigraphy of the Middle Jurassic of the southwest of the Republic of Tatarstan. *Stratigraphy. Geological Correlation*, 1, pp. 31–46. (In Russ.)
- Naumov V.A. (1989). Optical determination of sedimentary rock components. Moscow: Nedra, 349 p. (In Russ.)
- Nikolaev A.M. (2017). Isomorphism, conditions of formation and properties of biogenic apatite and associated orthophosphates. *Cand. Geol. and Min. Sci. Diss.* St. Petersburg: St. Petersburg State University, 141 p. (In Russ.)
- Nikolaeva V.M., Shilovsky O.P., Korolev E.A. (2014). Morphological features of pyrite nodules of the Middle Jurassic sediments of the Central Russian Sea as a reflection of seeps of hydrogen sulfide fluids. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2014. Twenty years at the forefront of the geology of mineral deposits*. Miass: IMin UrO RAS, pp. 76–78. (In Russ.)
- Predtechenskaya E.A. Zlobina O.N. (2022). On the improvement of the scheme of catagenesis of the Lower-Middle Jurassic deposits of the Urengoy oil and gas bearing region based on mineral and structural indicators. *Oil and Gas Geology*, 2, *Serial edition: Geology and mineral resources of Siberia*, pp. 24–47. (In Russ.)
- Rozanov A.Yu. (2002). *Bacterial paleontology*. Moscow: PIN RAS, 188 p. (In Russ.)
- Rozanov A.Yu. (2011). *Fossil bacteria and other microorganisms in terrestrial rocks and astromaterials. An atlas of photographs*. Moscow: PIN RAS, 172 p. (In Russ.)
- Savelyeva O.P., Savelyev D.P., Filosofova T.M. (2019). Accumulation of uranium and yttrium by bone detritus in carbonaceous rocks of the Kamchatka Cape peninsula. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2(42), pp. 77–83. (In Russ.)
- Tyuleneva V.M., Bystrov I.G., Rasulova S.D., Kaminov B.Yu. (2014). Features of complex organophosphate ores in the Yeregeninsky district of Kalmukia. *Razvedka i okhrana nedor*, 7, pp. 6–12. (In Russ.)
- Chernyshov N.M., Sharkov A.A., Molotkov S.P. (2012). Comparative characteristics of Upper Oligocene uranium-rare metal organogenic phosphate deposits of Mangyshlak and Upper Devonian of the same type mineralization in the roof of the Mikhailovsky KMA deposit. *Region: systems, Economics, management*, 1(16), pp. 42–54. (In Russ.)
- Sharkov A.A. (2015). Geological phenomenon of uranium-rare metal deposits. *Priroda*, 2, pp. 21–30. (In Russ.)
- Sharkov A.A. (2014). Patterns of distribution of the main components in ore deposits of uranium-rare metal deposits of the Eastern Parathetis. *Razvedka i okhrana nedor*, 11, pp. 7–12. (In Russ.)
- Sharkov A.A. (2002). Unique uranium deposits. *Priroda*, 3, pp. 3–12. (In Russ.)
- Shatrov V.A., Wojciechowski G.V. (2009). The use of lanthanides for reconstructions of sedimentation environments in the Phanerozoic and Proterozoic (using the example of sections of the cover and the foundation of the East European platform). *Geochemistry*, 8, pp. 805–824. (In Russ.)
- Shilovsky O.P., Khasanov R.R. (2020). Geochemical features of pyrite pseudomorphoses from plant residues from Upper Jurassic deposits of the

Republic of Tatarstan. *Metallogeny of ancient and modern oceans-2020. Critical metals in ore-forming systems*. Miass: YUU FNC MiG UrO RAS, pp. 228–231. (In Russ.)

Zorina S.O. (2003). Mesozoic of the north-east of the Ulyanovsk-Saratov trough. *Cand. Geol. and min. Sci. Diss.* Kazan: Kazan State University, 24 p. (In Russ.)

### About the Authors

*Mikhail S. Glukhov*—Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Department of Regional Geology and Mineral Resources, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University; Associate Professor, Department of Geology and Hydrometeorology, Samarkand State University named after Sharof Rashidov

15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620110, Russian Federation

e-mail: Gluhov@igg.uran.ru

*Oleg P. Shilovsky*—Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor at the Department of Regional Geology and Mineral resources, Institute of geology and petroleum technologies, Kazan (Volga Region) Federal University

4/5 Kremlevskaya st., Kazan, 420111, Russian Federation  
e-mail: biarmiceras@gmail.com

*Alina R. Gainanova*—Engineer, TatNIPIneft Tatneft PJSC  
216 Sovetskaya st., Almetyevsk, 423462, Russian Federation

*Almaz I. Mullakaev*—Assistant Professor at the Department of Regional Geology and Mineral resources, Institute of geology and petroleum technologies, Kazan (Volga Region) Federal University

4/5 Kremlevskaya st., Kazan, 420111, Russian Federation  
e-mail: almazmullakaev@gmail.com

*Manuscript received 22 August 2024;  
Accepted 21 January 2025; Published 30 March 2025*

© 2025 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)