

в зоне разлома, активного в кайнозой и потенциально рудогенерирующего. Характер распределения РЗЭ в углях, породных прослоях и гранитах подтверждает уже сделанный ранее вывод о связи РЗЭ и уранового оруденения в углях с гранитами [7]. Для изучения закономерностей распределения редких элементов в углях Раковской впадины было также проанализировано соотношение зольности каждой пробы к концентрации микроэлементов по сечениям 1 и 2. В результате чётко прослеживается, что с понижением зольности увеличивается концентрация группы тяжёлых лантаноидов, иттрия и урана. Это связано с преимущественно гидрогенным механизмом обогащения ими углей, в то время как лёгкие лантаноиды и цирконий могли быть привнесены как в растворенном виде, так и в составе терригенной взвеси на этапе формирования угленосных отложений, из коры выветривания гранитов обрамления.

**Заключение.** Угли и породные прослои в пределах Раковской впадины в сечении 1 более обогащены РЗЭ и ураном, хотя расположены на некотором расстоянии от тектонического разлома, но вблизи обрамляющего впадину гранитного массива, в котором также повышены содержания этих элементов. Пробы сечения 2 были отобраны на некотором удалении от гранитов, но угли здесь были интенсивно дислоцированы, располагаясь в активной тектонической зоне. Из этого следует, что обогащение угольных пластов редкоземельными элементами и ураном, в пределах впадины, по всей видимости, связано не с активной тектоникой и гидротермальными источниками, а с выносом этих элементов из коры выветривания гранитного массива. Ранее предполагалось наличие двух механизмов экзогенного поступления редких элементов в угли Раковской впадины – гидрогенного и терригенного [7]. Вывод был обоснован различием торий-уранового отношения в разных угольных сечениях – аномально низкого, характерного для гидрогенного оруденения и высокого, как у большинства терригенных осадочных пород. Полученные новые данные подтверждают ведущую роль экзогенных факторов в накоплении урана и РЗЭ в углях Раковской впадины.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ проект № 21-55-53013 ГФЕН\_а.*

#### Литература

1. Коковкин А.А. Новейшая структура Сихотэ-Алинского орогена, металлогения Сихотэ-Алинской рудной провинции // Региональная геология и металлогения. – 2013. – № 53. – С. 105–113.
2. Вялов В.И., Кузеванова Е.В., Нелюбов П.А. и др. Редкометалльно угольные месторождения Приморья // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 12. – С. 53–57.
3. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья (геологическое строение, минералогия и геодинамика углегенеза). – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 248 с.
4. Середин В.В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // Угольная база России. – М.: Геоинформмарк, 2004. – Т. 4. – С. 453–519.
5. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 384 с.
6. Угольная база России. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока (Хабаровский край, Амурская область, Приморский край, Еврейская АО). Под ред. В.И. Подольяна. – М.: Геоинформмарк, 1997. – Т. V. – Кн. 1. – 371 с.
7. Чекрызов И.Ю., Середин В.В., Арбузов С.И. Редкоземельные элементы и уран в углях Раковской впадины Южное Приморье // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. – Томск 2016. – С. 703–706.
8. Seredin V.V., Finkelman R.B. Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types // Int. J. Coal Geol. – 2008. – Vol. 76 (4). – P. 253–289
9. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // International Journal of Coal Geology. – 2012. – Vol. 94. – P. 67–93.

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ Mg-КАЛЬЦИТА В ДОННЫХ ОСАДКАХ СИПОВЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Рубан А.С.

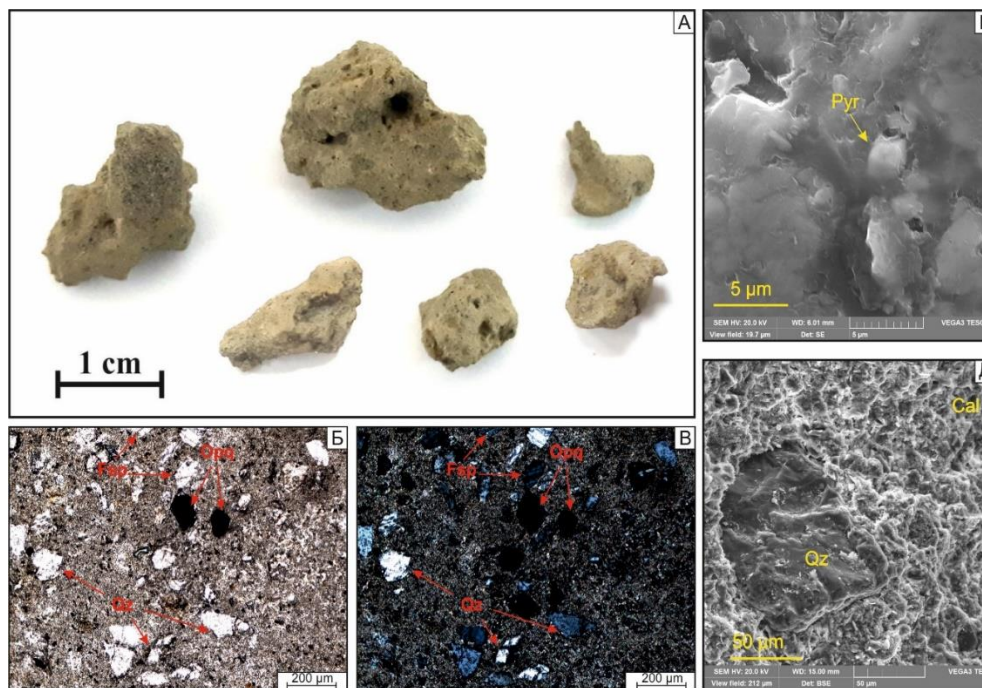
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Формирующиеся в сиповых областях аутигенные карбонаты представляют собой уникальные архивы для изучения физико-химических условий геологической среды и биогеохимических процессов, активность которых связана с миграцией метан-содержащих флюидов через толщу отложений [1–3]. Ввиду того, что аутигенные карбонатные образования, осадение которых связано с анаэробным окислением метана, сохраняют в своем составе «материнскую» углеродную метку, их детальное изучение также позволяет получить информацию об источниках метана, поступающего в атмосферу в результате его разгрузки с поверхности морского дна [4–7]. Более того карбонатообразование является естественным механизмом, ограничивающим поступления метана – сильнейшего парникового газа – в атмосферу.

Исследуемые аутигенные карбонатные образования были обнаружены в пробах донных осадков, отобранных в северной части моря Лаптевых на участке разгрузки метан-содержащих флюидов. Минералогические и изотопные исследования карбонатов проводились с использованием методов сканирующей электронной микроскопии (TESCAN VEGA 3), рентгенодифракционного анализа (РДА) (Bruker D2 Phaser), хроматомаксиметрии (Delta V Advantage).

Вмещающие донные осадки представлены очень плотным алевроитом черного цвета с примесью пелитовых частиц (13,28 %). Цвет карбонатных образований от светло-серого до желто-коричневого, текстура плотная, биотурбированная, крепкосцементированная, структура разноразмерная. По морфологии эти образования представлены стяжениями изометричной формы с размерами в поперечнике до 2 см и конкрециями диаметром

2...3 мм (рис., А). Результаты РДА показывают, что карбонатная фаза этих стяжений представлена Mg-кальцитом (25...36 %). Акцессорные некарбонатные минералы представлены в основном кварцем (22...28 %), полевым шпатом (23...29 %), глинистыми минералами (иллит + хлорит + монтмориллонит, 18...23 %), амфиболами (~ 1 %) и галитом (~ 1 %). Кварц и полевой шпат встречаются в виде полукруглых зерен алевритовой размерности, беспорядочно разбросанных в карбонатной матрице (рис. Б, В, Д). Результаты анализа EDS показывают, что содержание Mg в кальците варьировалось от 2 % до 8 %. В парагенезисе с Mg-кальцитом был обнаружен аутигенный пирит, представленный отдельными микрокристаллами кубической, иногда октаэдрической формы и отдельными фрамбоидами, внедренными в конкреции Mg-кальцита (рис. Г).



**Рис. Карбонаты из донных осадков северной части моря Лаптевых: общий вид изометричных стяжений (А); микрофотографии карбонатного цемента в параллельных (Б) и скрещенных (В) николях; СЭМ-фотографии идиоморфного пирита (Г) и обломков кварца (Д) в Mg-кальцитовом цементе. Qz – кварц, Cal – Mg-кальцит, Pyr – пирит, Fsp – полевые шпаты, Orq – непрозрачные минералы.**

Состав стабильных изотопов углерода и кислорода исследуемых карбонатных стяжений характеризуется крайне близкими значениями. Все образцы показывают отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}$  (от -27,5 ‰ до -28,2 ‰ VPDB) и положительные значения  $\delta^{18}\text{O}$  (от 3,5 ‰ до 3,8 ‰ VPDB). Как правило, карбонатам свойственны более высокие значения  $\delta^{13}\text{C}$ , чем в метане, участвующим в их образовании. Например, карбонаты, образованные из биогенного метана, имеют чрезвычайно низкие значения  $\delta^{13}\text{C}$  (-60 ‰), в то время как изотопные значения биогенного метана варьируются от -50 ‰ до -110 ‰ [8]. Отрицательный изотопный состав углерода исследованных образцов карбонатов (среднее  $\delta^{13}\text{C} = -27,7$  ‰) указывает на то, что источником углерода является в основном термогенный метан (значения  $\delta^{13}\text{C}$  термогенного метана находятся в диапазоне от -30 ‰ до -50 ‰ [9]). Следует отметить, что карбонаты, образующиеся в результате окисления сырой нефти, имеют значения  $\delta^{13}\text{C}$  в диапазоне от -25 ‰ до -30 ‰, но в этом случае на поверхности стяжений отмечаются пятна нефти [4, 10–12]. В нашем случае подобные признаки обнаружены не были. Вклад осадочного органического вещества не учитывался, поскольку общее содержание органического углерода в отложениях, собранных на участках отбора карбонатов и вблизи них, не превышает 1 % [13]. Теоретические значения  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  были рассчитаны с использованием температуры придонной морской воды и уравнения, предложенного Андерсоном и Артуром [14]. Средняя температура придонной морской воды на станциях отбора карбонатов составляла около -1,5 °C. Рассчитанные значения  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  находятся в диапазоне от -0,5 ‰ до -0,2 ‰ VSMOW и сопоставимы со значениями  $\delta^{18}\text{O}$  придонной морской воды в северной части моря Лаптевых (от -0,7 ‰ до -0,4 VSMOW ‰ [15]). Равновесие  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  и  $\delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}}$ , вероятно, указывает на то, что температура поровой воды, из которой осаждались исследуемые аутигенные карбонаты, была близка к температуре придонной воды.

Присутствие исследуемых стяжений в верхнем (2...5 см) горизонте толщи донных осадков в совокупности с расчётными данными о температуре поровой воды при осаждении карбонатов может говорить о близкповерхностном положении сульфат-метановой транзитной зоны. Включения аутигенного пирита в Mg-кальците является свидетельством активности процесса бактериальной сульфат-редукции при анаэробном окислении метана. Производимый при этом сероводород, взаимодействуя с содержащимися в поровой воде ионами железа, способствовал осаждению моносulfидов железа, которые затем перекристаллизовывались в пирит.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-77-00016).*

Литература

1. Bayon G., Dupré S., Ponzevera E., Etoubleau J., Chéron S., Pierre C., Mascle J., Boetius A., De Lange G.J. Formation of carbonate chimneys in the Mediterranean Sea linked to deep-water oxygen depletion // *Nature geoscience*. – 2013. – Vol. 6. – 755–760.
2. Cui H., Kaufman A.J., Xiao S., Zhou C., Liu, X.M. Was the Ediacaran Shuram Excursion a globally synchronized early diagenetic event? Insights from methane-derived authigenic carbonates in the uppermost Doushantuo Formation, South China // *Chemical Geology*. – 2017. – Vol. 450. – 59–80.
3. Thiagarajan N., Crémière A., Blättler C., Leland A., Kirsimäe K., Higgins J., Brunstad H., Eiler J. Stable and clumped isotope characterization of authigenic carbonates in methane cold seep environments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2020. – Vol. 279. – 204–219.
4. Mansour A.S., Sassen R. Mineralogical and stable isotopic characterization of authigenic carbonate from a hydrocarbon seep site, Gulf of Mexico slope: Possible relation to crude oil degradation // *Marine Geology*. – 2011. – Vol. 281. – 59–69.
5. Peckmann J., Thiel V. Carbon cycling at ancient methane-seeps // *Chemical Geology*. – 2004. – Vol. 205. – 443–467.
6. Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V., DeFreitas D.A., Kennicutt M.C. Thermogenic vent gas and gas hydrate in the gulf of Mexico slope: Is gas hydrate decomposition significant? // *Geology*. – 2001. – Vol. 29. – 107–110.
7. Xi S., Zhang X., Du Z., Li L., Wang B., Luan Z., Lian C., Yan J. Laser Raman detection of authigenic carbonates from cold seeps at the Formosa Ridge and east of the Pear River Mouth Basin in the South China Sea // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 168. – 207–224.
8. Whiticar M.J., Faber E., Schoell M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO<sub>2</sub> reduction vs. acetate fermentation-Isotope evidence // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1986. – Vol. 50. – 693–709.
9. Sackett W.M. Carbon and hydrogen isotope effects during the thermocatalytic production of hydrocarbons in laboratory simulation experiments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1978. – Vol. 42. – 571–580.
10. Feng D., Chen D., Peckmann J., Bohrmann G. Authigenic carbonates from methane seeps of the northern Congo fan: Microbial formation mechanism // *Marine and Petroleum Geology*. – 2010. – 27. – 748–756.
11. Roberts H.H., Feng D., Joye S.B. Cold-seep carbonates of the middle and lower continental slope, northern Gulf of Mexico // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. – 2010. – Vol. 57. – 2040–2054.
12. Sun Y., Gong S., Li N., Peckmann J., Jin M., Roberts H.H., Chen D., Feng D. A new approach to discern the hydrocarbon sources (oil vs. methane) of authigenic carbonates forming at marine seeps // *Marine and Petroleum Geology*. – 2020. – Vol. 114. – 104230.
13. Гринько А.А., Гончаров И.В., Шахова Н.Е., Густафссон О., Обласов Н.В., Романкевич Е.А., Зарубин А.Г., Кашапов Р.С., Гершелис Е.В., Дударев О.В., Мазуров А.К., Семилетов И.П., Черных Д.В. Характерные особенности молекулярного состава органического вещества осадков моря Лаптевых в районах аномального выброса метана // *Геология и геофизика*. – 2020. – №4. – С. 560–585.
14. Anderson T.F., Arthur M.A. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems. In: *Stable Isotopes in Sedimentary Geology*, Society of Economic Paleontology and Mineralogy. – Short Course 10. – Section 1.1-1.151.
15. Dubinina E.O., Miroshnikov A.Y., Kossova S.A., Shchuka S.A. Modification of the Laptev Sea Freshened Shelf Waters based on Isotope and Salinity Relations // *Geochemistry Int.* – 2019. – Vol. 57. – 1–19.

**ХЕМОСТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ  
РАННЕПАЛЕОГЕНОВЫХ ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯ ЗАУРАЛЬЯ**

**Смирнов П.В.**

*Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия*

Изучение эоценовых отложений неизменно привлекает внимание исследователей по всему миру, в первую очередь, по причине приуроченности к этой эпохе гипертермальных событий – глобального катастрофического события на границе палеоцена и эоцена (PETM) и следующими за ним климатических оптимумов в раннем и среднем эоцене. Механизмы и динамика осадконакопления раннего палеогена иллюстрируют, в том числе, реакцию системы Земли на высокие глобальные температуры. Начиная примерно с 59 млн. лет назад, температура на поверхности Земли непрерывно повышалась в направлении палеоцен-эоценового климатического максимума (около 55 млн лет назад) и климатического оптимума раннего эоцена (ЕЕСО), расширенного интервала пика кайнозойского глобального потепления, который произошел приблизительно от 53,3 до 49,1 млн лет [5, 7, 8]. Последовавший далее климатический оптимум среднего эоцена (МЕСО, ~ 40 млн лет) был переходным периодом глобального потепления, затем сменившись тенденцией длительного кайнозойского похолодания [6].

В случае Западной Сибири, особый интерес к изучению осадочной летописи эоцена определяется и тем, что средний и поздний эоцен стал заключительным этапом эволюции мезозойско-кайнозойского морского бассейна Западной Сибири – в эту эпоху обширные пространства Западной Сибири занимало т.н. эоценовое «Тавдинское море» за сокращением, которого последовала полная переконфигурация палеогеографических условий и переход к континентальным обстановкам осадконакопления в Западной Сибири. Тавдинская свита P2tv впервые была установлена еще А.К. Богдановичем в 1944 г. как тавдинские слои [1], она формирует значительный объем кайнозойских отложений в пределах Западно-Сибирской низменности, в Зауралье и в северной части Тургайского прогиба. Формирование ее осадков было связано с последним этапом существования морского режима в истории Западно-Сибирского бассейна, когда еще поддерживалась устойчивая связь с северной частью Кавказско-Копетдагского моря через Тургайский пролив [2, 4].

Настоящая статья представляет первые результаты интерпретации выявленных вариаций распределения нормализованных к алюминию концентраций элементов, рассматриваемых в качестве геохимических индексов и фациальных индикаторов палеопродуктивности, терригенного сноса, окислительно-восстановительных условий.