

## С Е К Ц И Я 2

### МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

#### MG-КАЛЬЦИТ В ДОННЫХ ОСАДКАХ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ: УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И СВЯЗЬ С АНАЭРОБНЫМ ОКИСЛЕНИЕМ МЕТАНА

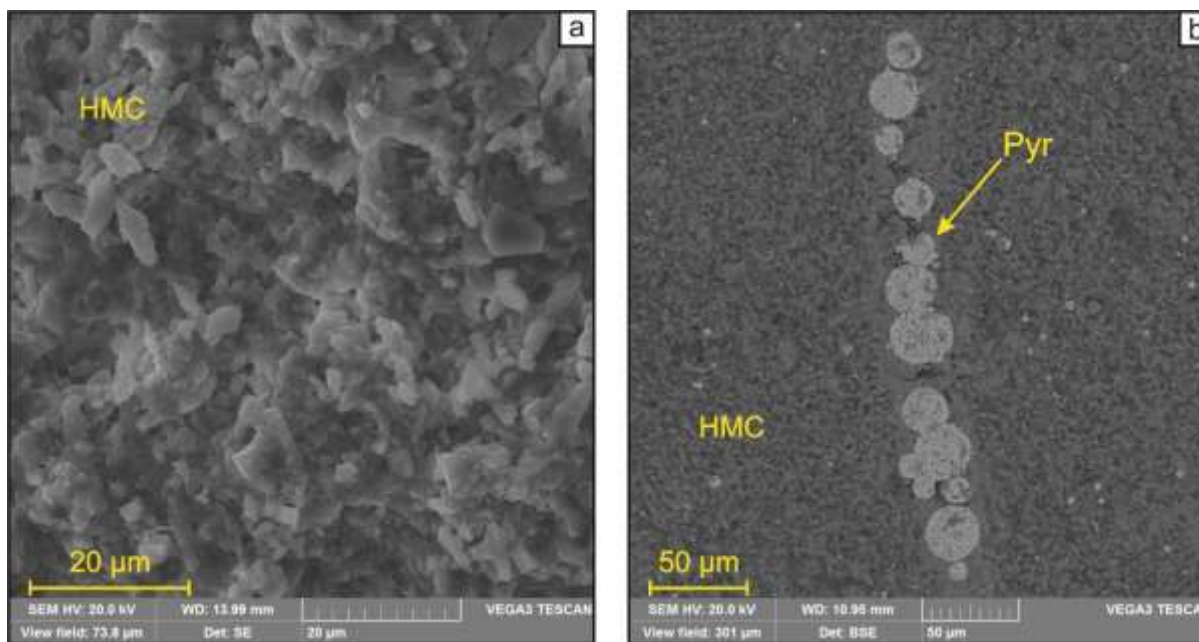
Рубан А.С.

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

Разгрузка метан-содержащих флюидов с поверхности морского дна в водную толщу (англ. cold methane seep) является широко распространенным явлением, проявляющееся на шельфах и континентальных склонах внутренних и окраинных морей по всему миру. При столкновении восходящего потока метана и нисходящего диффузионного потока сульфата из морской воды создается сульфат-метановая транзитная зона, доминирующими биогеохимическими процессами в которой являются анаэробное окисление метана и бактериальная сульфатредукция, управляемые консорциумом анаэробных метанооксиляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий [1]. В результате анаэробного окисления метана возникает избыток растворенного неорганического углерода, а также увеличивается щелочность поровой воды, что в присутствии в поровой воде катионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) способствует осаждению карбонатов [2], отличающихся широким спектром минералогического состава. Аутигенные карбонаты метановых сипов являются уникальным архивом для изучения условий окружающей среды, в том числе биогеохимических процессов, связанных с миграцией метаносодержащего флюида через толщу донных осадков [3].

Изученные образцы карбонатных корок были обнаружены в пробах донных осадков, отобранных на малоизученном участке разгрузки метан-содержащих флюидов на континентальном склоне моря Лаптевых. Аналитические работы включали в себя минералогические (сканирующая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ), петрографические (оптическая микроскопия) изотопные (хроматомасс-спектрометрия) и геохимические (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой) исследования.

В морфологическом отношении изученные карбонаты представлены тремя разновидностями: изометричными корками, сферическими или эллиптическими конкрециями и вытянутыми цилиндрическими конкрециями размером до 10 см в диаметре. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, среди карбонатных минералов в стяжениях выявлены Mg-кальцит, доломит и кутногорит, суммарное содержание которых варьирует от 32,8 до 52,1 %. Обломочная фракция представлена кварцем (22,1...27,9 %), полевыми шпатами (11,7...24,8 %) и глинистыми минералами (11,2...20,3 %). Кварц и полевые шпаты представлены округлыми зернами алевритовой размерности, беспорядочно распределенными в карбонатной матрице. Микроструктурная карбонатная матрица в основном состоит из агрегата Mg-кальцита и глинистых минералов. Значения  $d_{104}$  валовых проб карбонатных стяжений находятся в пределах от 2,993 Å до 3,008 Å, а расчетные значения содержания  $\text{MgCO}_3$  изменяются в диапазоне от 9,1 до 14,0 мольных %.



*Рис. СЭМ-снимки, иллюстрирующие микроструктуру аутигенных карбонатов континентального склона моря Лаптевых: HMC – высокомагнезиальный кальцит, Pyrr – пирит*

Низкие значения  $\delta^{13}\text{C}$  изученных карбонатов (от 50,6 до 32,4 ‰) свидетельствуют о том, что их формирование происходило в результате анаэробного окисления метана. Полученные значения  $\delta^{13}\text{C}$  можно разделить на две группы: 1-я группа со значениями  $\delta^{13}\text{C}$  от –35,8 до –32,4 ‰ и 2-я группа со значениями  $\delta^{13}\text{C}$  от –50,6 до –41,9 ‰. Резко отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}$  карбонатов 2-й группы указывают на то, что источником углерода является биогенный метан, тогда как значения  $\delta^{13}\text{C}$  1-й группы, вероятно, свидетельствуют о смешении биогенного метана с углеродом из других источников, наиболее вероятным из которых является термогенный метан. Слабая изменчивость изотопного состава кислорода ( $\delta^{18}\text{O} = 4,7 \dots 5,5 \text{ ‰}$ ) свидетельствует об отсутствии существенных колебаний температуры придонной воды в процессе осаждения карбонатов. Теоретическое значение  $\delta^{18}\text{O}$  для Mg-кальцита, равновесного с морской водой в придонном горизонте, составляет 4,0 ‰, что ниже измеренных значений  $\delta^{18}\text{O}$  в изученных образцах. На участках разгрузки метан-содержащих флюидов обогащение поровой воды тяжелым изотопом кислорода может быть вызвано дегидратацией глинистых минералов [4], дестабилизацией газовых гидратов [5], а также глубинными флюидами, поступающими из нефтяных и/или газовых месторождений [6]. Сейсмические данные демонстрируют наличие многочисленных акустических аномалий с признаками газонасыщенности и горизонта BSR в отложениях континентального склона моря Лаптевых [7], что в совокупности с изотопным составом карбонатного углерода может свидетельствовать о наличии газовых гидратов метана в осадочном чехле континентального склона моря Лаптевых.

Присутствие фрамбоидального пирита в карбонатном цементе (рис.) изученных стяжений указывает на высокую активность бактериальной сульфатредукции при анаэробном окислении метана. Карбонаты демонстрируют слабое обогащение кобальтом, умеренное и сильное обогащение мышьяком, молибденом и сурьмой и сильное обогащение ураном. As, Sb и Co коррелируют с содержанием фрамбоидального пирита, что указывает на роль сульфидов железа в накоплении некоторых редокс-чувствительных микроэлементов. Мы предполагаем, что восходящие метан-содержащие флюиды играют существенную роль в обогащении аутигенных карбонатов As, Mo, Sb, U на материковом склоне моря Лаптевых.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-77-00033).*

#### Литература

1. Boetius A., Ravensschlag K., Schubert C.J., Rickert D., Widdel F., Gleseke A., Amann R., Jørgensen B.B., Witte U., Pfannkuche O. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation methane // Nature. – 2000. – Vol. 407. – 623–626.
2. Smith J.P., Coffin R.B. Methane flux and authigenic carbonate in shallow sediments overlying methane hydrate bearing strata in Alaminos Canyon, Gulf of Mexico. Energies. – 2014. – Vol. 7. – 6118–6141.
3. 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.
4. Hesse R. Pore water anomalies of submarine gas-hydrate zones as tool to assess hydrate abundance and distribution in the subsurface: What have we learned in the past decade? // Earth-Science Rev. – 2003. – Vol. 61. – 149–179.
5. Hesse R., Harrison W.E. Gas hydrates (clathrates) causing pore-water freshening and oxygen isotope fractionation in deep-water sedimentary sections of terrigenous continental margins // Earth Planet. Sci. Lett. – 1981. – Vol. 55. – 453–462.
6. Sofer Z., Gat J.R. The isotope composition of evaporating brines: Effect of the isotopic activity ratio in saline solutions // Earth Planet. Sci. Lett. – 1975. – Vol. 26. – 179–186.
7. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) // Marine and Petroleum Geology. – 2022. – Vol. 138. – 105527.

### МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОСНОВНЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ВУЛКАНИТОВ САРАЛИНСКОГО ГРАБЕНА (КУЗНЕЦКИЙ АЛАТАУ)

**Адылбаев Р.Р.**

Научный руководитель доцент Гринёв О.М.

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

По результатам первоначальных исследований вулканитов грабена среди основных членов серии, имеющих бимодальный характер, было установлено ограниченное число промежуточных разновидностей, занимающих на TAS-диаграммах поля трахиандезитов, андезитобазальтов [2, 4–6]. В дальнейшем, при детальном изучении петрохимического состава имеющихся каменных материалов, а также при дополнительном полевом изучении ряда опорных разрезов вулканитов Саралинского грабена был уточнён первичный состав серий и выявлены среди них метабазаальты, что является результатом проявления поздне- и постмагматических гидротермально-метасоматических процессов типа пропилитизации, вплоть до появления среди вулканитов кварцевых жил и локальной эпидотизации [3].

В ходе полевых исследований был изучен один из опорных разрезов вулканитов грабена по левому борту р. Левая Сарала, в котором установлено четыре вулканических ритма.

Образцы прежних и новых коллекций вулканитов детально изучены микроскопически и на растровом электронном микроскопе в режиме картирования методом энергодисперсионного микроанализа (EDS) в ЦКП «Геохимия природных систем» ТГУ ГГФ.

**Полевые исследования.** Для установления состава основных разновидностей вулканитов Саралинского грабена был пройден обзорный геологический маршрут (совместно с академиком В.В. Ярмолюком), проходящий в