

УДК 553.064/065(265.53)

ГЕНЕЗИС БАРИТОВ ВПАДИНЫ ДЕРЮГИНА (ОХОТСКОЕ МОРЕ)

© 2018 М.Г. Блохин¹, В.В. Ивин³, П.Е. Михайлик^{1,2}, Е.В. Михайлик¹,
Ю.М. Иванова¹, Е.В. Еловский¹, Н.В. Зарубина¹, В.В. Иванов¹, Д.С. Остапенко¹

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, 690022;
e-mail: blokhin@fegi.ru

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690091; e-mail: rectorat@dyfu.ru

³Национальный научный центр морской биологии ДВО РАН, Владивосток, 690041;
e-mail: victor.ivin@mail.ru

Установлены содержания и закономерностей распределения редкоземельных элементов в баритах впадины Дерюгина (Охотское море), с целью определения их генезиса. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии влияния гидротермальной компоненты при формировании баритов. Источником редкоземельных элементов является морская вода, а их состав, по-видимому, отвечает составу холодных сипов.

Ключевые слова: бариты, редкоземельные элементы, впадина Дерюгина, Охотское море.

ВВЕДЕНИЕ

Аутигенные морские баритовые образования (BaSO₄) встречаются в разнообразных геологических обстановках, а их формирование обусловлено различными физико-химическими, а также биологическими процессами (Богданов, 2006; Gonzalez-Munoz et al., 2012; Hein et al., 2007; Monnin et al., 2003; Vanneste et al., 2013). В морской обстановке существует несколько различных способов образования барита, которые сводятся к взаимодействию между собой водными массами, обогащенными барием (флюид) и сульфат-ионом (обстановка осадения). В результате перенасыщения раствора происходит выпадение сульфата бария (Hein et al., 2007; Paytan et al., 2002). Флюиды (морская вода, поровые воды или гидротермальный раствор) и среда (толща воды, поверхность дна, осадки, холодные сипы или обстановки гидротермального рудогенеза) влияют на геохимические характеристики барита (Griffith, Paytan, 2012). Выделяется четыре общих режима формирования барита: (1) гидрогенный или пелагический, образующийся в водной толще при разложении органического вещества, богатого барием; (2) гидротермальный — выпадает при смешении обогащенных Ba гидротермальных флюидов и морской воды вблизи дна; (3)

диагенетический — формируется в толще осадка в результате постседиментационных диагенетических процессов; (4) барит, сформировавшийся в результате развития в осадочном бассейне флюидов или холодных сипов, насыщенных барием, которые поставляются к поверхности дна тектоническими и гидрологическими процессами, не связанными с вулканической или гидротермальной активностью (Binns et al., 1997; Brumsack, 1986; Griffith, Paytan, 2012; Hein et al., 2007; Naehr et al., 2000; Torres et al., 1996).

Вариации химического микроэлементного и изотопного составов углерода, кислорода и серы морских баритов используются при выводах о палеокеноалогических реконструкциях на предмет определения первичной продуктивности в прошлом; понимании роли и потенциального значения бактерий при осаждении барита, как количественные параметры, контролирующие сохранение барита в отложениях; для определения влияния диагенеза на геохимию барита (Griffith, Paytan, 2012; Martin et al., 1995). Однако, все эти выводы возможны только после точного определения генезиса этих образований. В настоящее время одним из дискуссионных объектов в вопросе генезиса является баритовая минерализация впадины Дерюгина в Охотском море.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Бариты впадины Дерюгина впервые были драгированы в 1981 г. при участии Б.И. Васильева и идентифицированы М.И. Липкиной в 1987 г. (Астахова и др., 1987). В последующие годы был выполнен значительный объем экспедиционных (Отчет ..., 2011¹; Отчет ..., 2013²; SO178 ..., 2004³) и лабораторных исследований (Деркачев и др., 2000; Greinert et al., 2002). Полученные данные позволили оценить площадь баритоносной поверхности дна во впадине Дерюгина как потенциально крупное месторождение барита, с прогнозными ресурсами 5 млн т (Aloisi et al., 2004).

Вопрос о происхождении и источниках вещества, формирующего охотоморские баритовые постройки, до сих пор остается открытым. Одни исследователи считают, что формирование баритов связано с низкотемпературной гидротермальной деятельностью (Астахов и др., 2017; Ахманов и др., 2015), другие — связывают их образование с холодной газовой-флюидной эманацией (холодные сипы) (Деркачев и др., 2002; Aloisi et al., 2004; Greinert et al., 2002). При аутигенном минералообразовании состав новообразований должен наследовать особенности концентрирования и распределения различных элементов, отвечающий одному из этих процессов.

В настоящее время при интерпретации данных о генезисе горных пород используют сведения по составу в них редкоземельных элементов (РЗЭ, лантаноиды). Эта группа металлов является уникальной за счет своих химических свойств и при различных физико-химических показателях морской среды формирует особый состав, который отражает условия формирования. Такая способность возникает за счет химических свойств РЗЭ в природных процессах, которая позволяет наследовать составы лантаноидов исходного вещества.

Настоящая работа посвящена изучению распределения РЗЭ в баритах впадины Дерюгина с целью определения источника вещества (гидротермальный или холодные сипы), формирующего эти образования.

¹ Отчет о результатах экспедиционных исследований в рейсе № 54 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (21 мая – 19 июня 2011 г.) (научный руководитель — В.В. Ивин). Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, 2011. 207 с.

² Отчет о результатах экспедиционных исследований в рейсе № 61 НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (30 апреля – 08 июня 2013 г.) (научный руководитель — В.В. Ивин). Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, 2013. 176 с.

³ SO178-KOMEX Cruise Report: RV SONNE. Mass exchange processes and balances in the Okhotsk Sea / Eds. Dullo W.-Chr., Biebow N., Georgeleit K. (<https://epic.awi.de/13174/1/Dul2004a.pdf>)

Материалом для работы послужили образцы баритов, поднятые дночерпателем во впадине Дерюгина (Охотское море) (рис. 1) в 54-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2011 г. на станциях Lv54-7-4 (53.988° с.ш.; 146.310° в.д., глубина — 1460 м), Lv54-35 (54.004° с.ш.; 146.292° в.д., глубина — 1492 м). При интерпретации данных по составу РЗЭ в баритах были также использованы результаты по содержанию этих химических элементов в придонной морской воде, отобранной с глубины 1444 м на станции Lv54-7-1 (53.985° с.ш.; 146.309° в.д.) в этом же рейсе.

Минеральный состав баритов был изучен в Центре коллективного пользования (ЦКП) «Приморский центр локального элементного и изотопного анализа» ДВГИ ДВО РАН методом порошковой микродифрактометрии (аналитик Н.В. Груда) на дифрактометре MiniFlex II производства RIGAKU (Япония) и методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (аналитики А.В. Поселужная и А.Е. Красненко) на электронном микроскопе Tescan Luga3 (Чехия).

Определение концентраций РЗЭ в баритах выполнялось с применением метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в вышеобозначенном ЦКП. Этот метод на сегодняшний день известен как наиболее точный метод для определения низких концентраций РЗЭ в различных геологических образцах. Анализ проводился нами из жидких проб с целью получить их максимальную представимость и однородность. Бариты, состоящие более чем на 95% из сульфата бария ($BaSO_4$), относятся к труднорастворимым минералам при вскрытии проб для их последующего анализа. К основным способам их разложения при переводе в раствор можно отнести сплавление и спекание с различными плавнями.

Методики определения РЗЭ в баритах представлены в нескольких работах, относящихся к элементному и изотопному анализу (Guichard et al., 1979; Martin et al., 1995). К примеру, нейтронно-активационный метод может не дать требуемой точности, которая так важна при интерпретации данных по составу РЗЭ, а также не позволяет определить весь спектр элементов. При определении РЗЭ в баритах методом ИСП-МС сильному влиянию со стороны бария подвержены аналитические изотопы Sm, Eu и Gd, вследствие многократного превышения концентрации Ba над содержанием РЗЭ, что может привести к искажению данных и ошибочной трактовке результатов. Например, в публикации (Baïoumy, 2015) посвященной изучению баритов оазиса Бахария (Египет), приведены данные

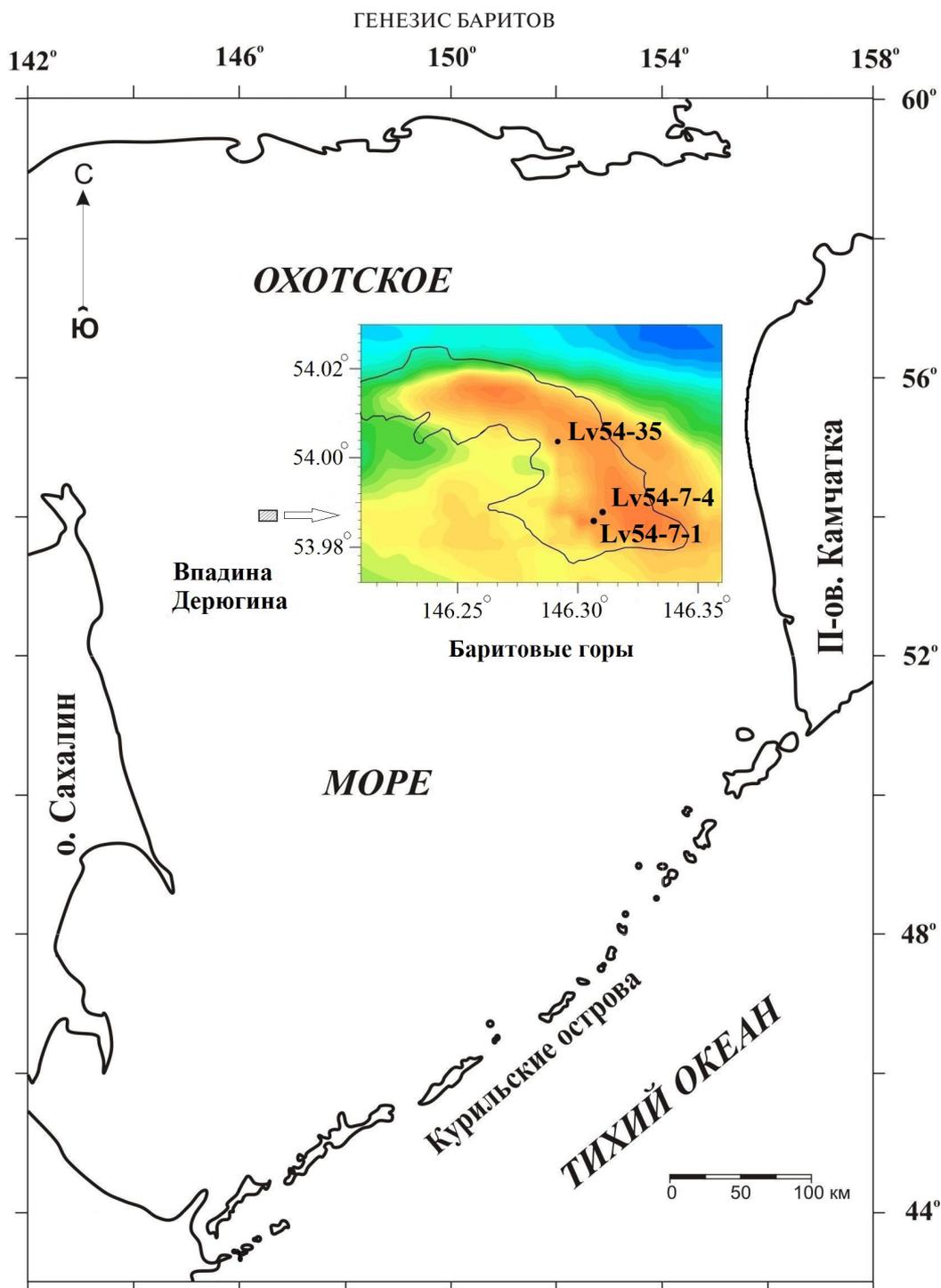


Рис. 1. Карта района отбора проб баритов и морской воды.

с аномально высокими концентрациями этих трех редких земель, что, по нашему мнению, скорее всего, не отвечает действительности.

Основная проблема, которую необходимо было решить для точного определения РЗЭ и, особенно Eu, с применением метода ИСП-МС — устранение влияния высоких концентраций Ba в анализируемых растворах. Это достигалось разложением образца в тefлоновых тиглях с последующим осаждением Ba в виде его сульфата добавлением стехиометрического количества

H_2SO_4 для удаления избытка Ba из раствора (аналитик Ж.А. Щека). Определение РЗЭ было выполнено на масс-спектраторе Agilent 7700х (Япония) с использованием аппаратных средств прибора (столкновительная ячейка для устранения интерференций, наполняемая гелием) и, при необходимости, математической коррекцией получаемых результатов (Еловский, 2015). Основным преимуществом данной методики является многократное уменьшение соотношения Ba/Eu, а также невысокий фактор

разбавления 150 (в рутинных методиках этот фактор обычно достигает 5000 и более), что не снижало сильно концентрацию определяемых элементов в растворе. В тоже время процесс осаждения бария мог привести к занижению получаемых результатов в связи с сорбцией РЗЭ из раствора на вновь образовавшихся кристаллах барита. Возможность сорбции РЗЭ при этих условиях была проверена нами по методике «введено-найденно». Было показано, что сорбции не происходит и методика может быть применена для количественного определения РЗЭ (Блохин и др., 2016, 2017).

Определение РЗЭ в пробе морской воды было выполнено также ИСП-МС методом на масс-спектрометре Agilent 7700x с предварительным концентрированием редкоземельных элементов на ионообменной смоле Lewatit® TP 207 (Еловский, Михайлик, 2016).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

По данным порошковой микродифрактометрии и СЭМ (рис. 2; табл. 1) образование сложено практически чистым баритом. Ромбовидная морфология кристаллов барита (рис. 3) является типичной для диагенетических образований различных областей Мирового океана (Griffith, Paytan, 2012).

Полученные данные по содержанию РЗЭ для баритов составили от $n \cdot 10^{-1}$ мг/кг для легких, до

$n \cdot 10^{-3}$ мг/кг для средних и тяжелых РЗЭ в баритах впадины Дерюгина, а в пробе морской воды — от целых нг/л для легких РЗЭ до $n \cdot 10^{-2}$ нг/л для средних и тяжелых РЗЭ (табл. 2).

Распределение сланец (РААС) нормализованных РЗЭ баритов и придонной (глубина 1444 м) морской воды впадины Дерюгина (рис. 4) показывает изменение отношения легких РЗЭ к тяжелым La_{cn}/Lu_{cn} (cn — нормализованные по сланцу) в пределах 0.54–0.96, что близко для придонной морской воды впадины Дерюгина (0.63). В гидротермальных баритах величина этого коэффициента больше единицы и увеличение тяжелых лантаноидов по отношению к легким не выявлено (Дубинин, 2006). Такой состав РЗЭ в исследованных нами баритах отражает распределение растворенных форм РЗЭ в придонной морской воде впадины Дерюгина.

Величина цериевой аномалии (Ce^*), рассчитанная, как $Ce/Ce_{paas}/((0.5 \cdot La/La_{paas}) + (0.5 \cdot Pr/Pr_{paas}))$, меньше единицы, так же наследуется из морской воды (рис. 4).

Обедненность церием, изучаемых нами охотоморских баритовых построек, скорее всего, указывает на быструю скорость роста этих образований и наследуется из растворов (сипы?), формирующих эти рудные образования. Положительной (>1) цериевой аномалией в океане характеризуются гидрогенные железомарганцевые образования, в которых церий накапливается за счет оксидативной сорбции еще в водной

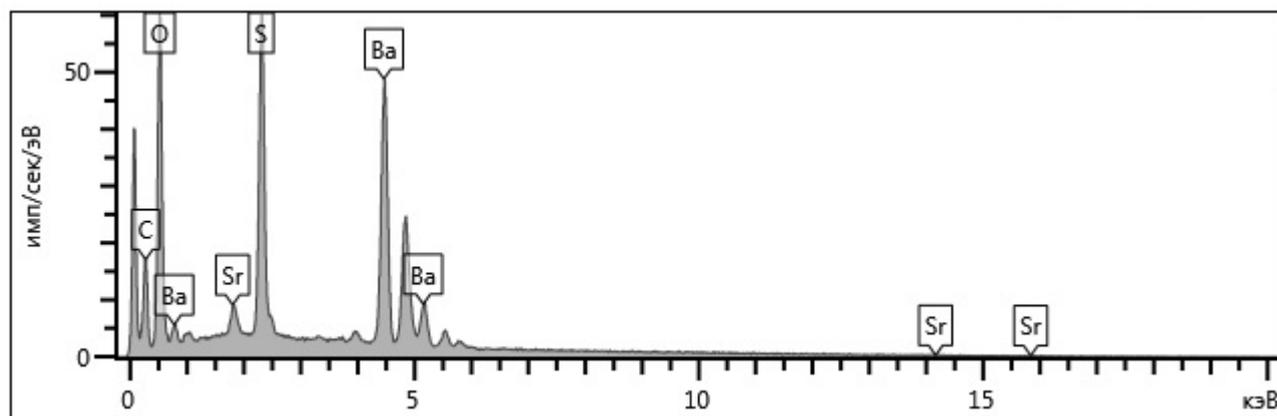


Рис. 2. Качественный химический состав баритовой минерализации впадины Дерюгина по данным СЭМ.

Таблица 1. Количественный химический состав баритовой минерализации впадины Дерюгина по данным СЭМ.

Элемент	Вес.%	Сигма Вес.%	Атом. %	Оксид	Вес.% оксида
O	29.15		67.27		
S	15.00	0.11	17.27	SO ₃	37.45
Sr	2.84	0.14	1.20	SrO	3.36
Ba	53.01	0.20	14.25	BaO	59.19
Сумма:	100.00		100.00		100.00

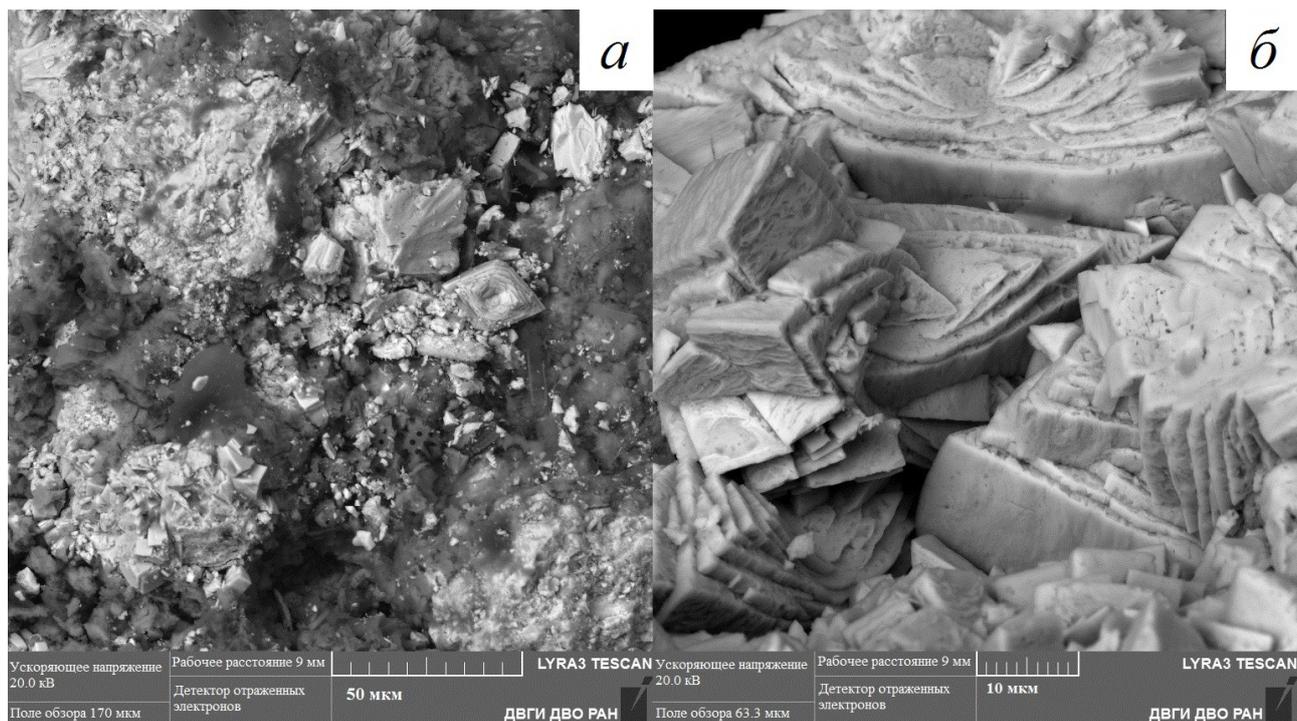


Рис. 3. Баритовая минерализация впадины Дерюгина под увеличением СЭМ.

Таблица 2. Содержание РЗЭ в баритах (мг/кг) и концентрация в морской воде (нг/л) из впадины Дерюгина

Элемент	Lv54-7-4/4	Lv-54-35	Lv54-4/2	Lv54-7-1
La	0.574	0.626	0.163	5.220
Ce	0.809	0.417	0.090	3.376
Pr	0.097	0.069	0.011	0.770
Nd	0.359	0.279	0.035	3.173
Sm	0.072	0.067	0.010	0.628
Eu	0.003	0.008	0.001	0.160
Gd	0.091	0.093	0.012	0.819
Tb	0.020	0.019	0.003	0.110
Dy	0.093	0.084	0.013	0.804
Ho	0.020	0.017	0.003	0.202
Er	0.063	0.053	0.008	0.661
Tm	0.011	0.010	0.002	0.091
Yb	0.063	0.056	0.010	0.568
Lu	0.012	0.011	0.002	0.093

толще на взвешенных оксигидроксидах Fe-Mn (Дубинин, 2006).

Величина европиевой аномалии (Eu^*) изменяется от 0.20 до 0.59 ($Eu^* = Eu/Eu_{раас} / ((0.5 \cdot Sm / Sm_{раас}) + (0.5 \cdot Gd / Gd_{раас}))$). Это свидетельствует об отсутствии вклада гидротермального вещества при формировании баритов, так как подавляющее большинство морских образований сформированных в результате гидротермальной деятельности характеризуются величиной $Eu^* > 1$ (Дубинин, 2006).

По нашему мнению формирование отрицательной европиевой аномалии может быть обусловлено двумя факторами. Первый заключается в том, что приконтинентальный литогенез характеризуется интенсивной поставкой терригенного вещества питающих провинций (Безруков, Лисицин, 1957). Изучение минералого-геохимических особенностей осадка скважины MD01-2415 (Левитан и др., 2007), пробуренной в центральной части Охотского моря, показало, что формирование отрицательной

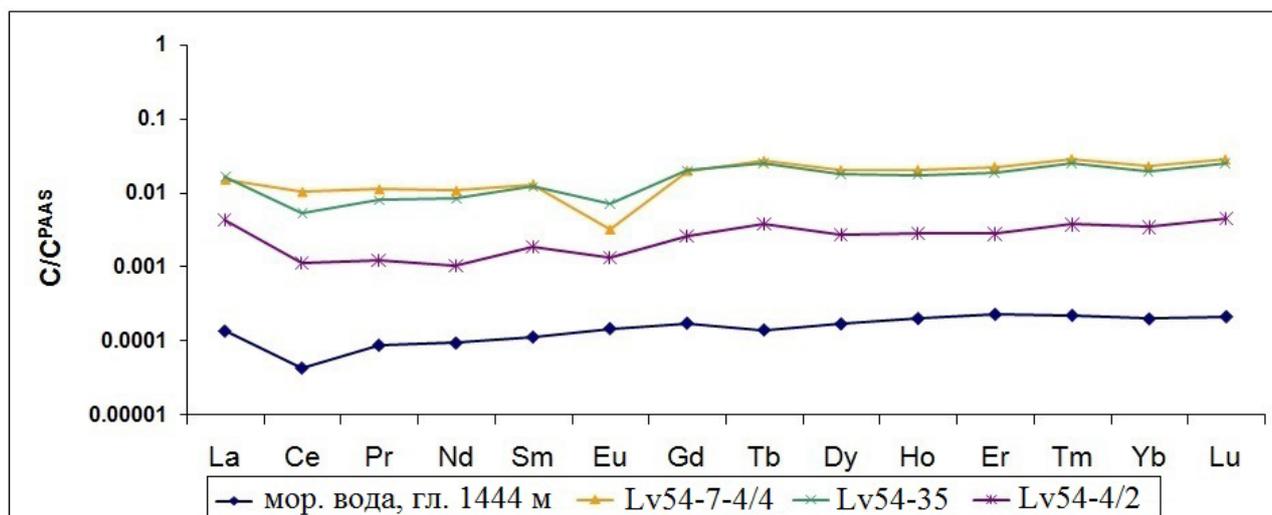


Рис.4. Распределение сланец (PAAS по (McLennan, 1989)) нормализованных РЗЭ в баритах и придонной (глубина 1444 м, станция Lv54-7-1) морской воде впадины Дерюгина.

европиевой аномалии здесь связано с гранитным веществом Охотского вулканического пояса, а также наличием остатков диатомовых организмов (Левитан и др., 2007). Более того, смектит, являющийся одним из главных глинистых минералов в осадках Охотского моря (Астахов и др., 2008; Волохин, 2012), также характеризуется отрицательной европиевой аномалией (Дубинин, 2006; Fagel et al., 1997). В условиях высоких скоростей седиментации происходит заражение баритов как аллотигенным, так и аутигенным веществом. При низких концентрациях РЗЭ в баритах формирование их валового состава зависит от примесной составляющей. В нашем случае это приводит к появлению отрицательной европиевой аномалии. Однако, состав РЗЭ поверхностных осадков (0–30 см) впадины Дерюгина, накопление которых происходит одновременно с ростом баритовых построек, имеет положительную европиевую аномалию (Eu* до 1.4) как в валовой пробе (Саттарова и др., 2014), так и в пробе после удаления аутигенных минеральных форм и, более того, в глинистой фракции осадка (Михайлик и др., 2016). Это связано с поставкой эрратического материала, в первую очередь р. Амур (Деркачев и др., 2004; Михайлик и др., 2016; Саттарова и др., 2014).

Вторая причина, приводящая к формированию состава РЗЭ, обедненного европием, баритов впадины Дерюгина, может крыться в деплетированности флюида (холодный сип) европием. Восстановление европия до степени окисления +2 (наиболее подвижная форма этого элемента) возможно при повышенных температурах (Sverjensky, 1984). В котловине Дерюгина в районе распространения баритовой минерализации отмечаются высокие концентрации метана в колонке осадка³ (от поверхности вниз по

колонке: 0–400 см — 40–70 мкл/л; 500–1800 см — 30 000–50 000 мкл/л, на глубине 1100 см от поверхности дна наблюдается обогащение осадка метаном до 80 000 мкл/л, фон 10–30 мкл/л) и в придонном слое воды до 1943 нл/л, при фоновых значениях 40–50 нл/л (Cruise ..., 1999; Cruise ..., 2000; Cruise ..., 2002). Изотопный состав серы и кислорода ($\delta^{34}\text{S}$: 21.0–38.6‰ CDT; $\delta^{18}\text{O}$: 9.0–17.6‰) в баритах отчетливо указывают на процессы биологической сульфат редукции, а значение $\delta^{13}\text{C}$ (> -43.5‰) в карбонатах этого района свидетельствует о биогенном источнике метана (Greinert et al., 2002). Эти данные согласуются с результатами изучения геохимии поровых вод колонки Ge 99-32, отобранной в непосредственной близости распространения баритовых построек впадины Дерюгина, которые подтверждают отсутствие влияния гидротермального источника вещества (Cruise ..., 1999). Генерация флюида, обогащенного барием, происходит на глубине 2 км при температурах 60°C в условиях катагенеза глинистых минералов (Bollwerk, 2002). Это подтверждается результатами Na-Li и Mg-Li геотермометров (Деркачев, Николаева, 2007). В этих условиях происходит восстановление европия и сорбция его твердой фазой глинистого вещества. В отсутствие влияния высокотемпературных гидротермальных флюидов, характеризующихся ярко выраженной положительной европиевой аномалией (Дубинин, 2006), формируется состав РЗЭ холодных сипов, обедненных европием, который наследуется при формировании баритами.

ВЫВОДЫ

Полученные данные по распределению РЗЭ в баритах впадины Дерюгина (низкие содержа-

ния РЗЭ и наличие отрицательной европиевой аномалии), а также особенности химического и изотопного составов, отсутствие температурных аномалий в районе проявления баритовой минерализации, геохимия поровых вод вмещающего осадка и, кроме того, морфология кристаллов, свидетельствуют о ведущей роли холодных сипов при формировании баритовой залежи. Гидротермальная составляющая на формирование баритовых построек значительного влияния не оказывает. Это согласуется с данными В.В. Саттаровой с соавторами (2014), которые показали, что валовый состав РЗЭ поверхностных осадков впадины Дерюгина формируется за счет терригенного сноса, а влияние гидротермальной составляющей не выявлено. Не стоит забывать и об участии микроорганизмов при формировании морских аутигенных минералов. Для более точного установления генезиса баритов впадины Дерюгина необходимо детальное выявление не только минеральных и геохимических критериев, но и углубленные микробиологические исследования.

Авторы выражают благодарность Капитану В.Б. Птушкину и экипажу 54-го рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев», а также М.И. Макарову и инженерному составу за слаженные действия и четкую организацию забортных работ, позволивших получить уникальный научный материал.

Научная экспедиция 54-го рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» была выполнена при финансовой поддержке Президиума ДВО РАН.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00194 мол_а.

Список литературы

Астахов А.С., Астахова Н.В., Саттарова В.В. и др. Осадконакопление и рудогенез во впадине Дерюгина (Охотское море). Владивосток: Дальнаука, 2008. 289 с.

Астахов А.С., Ивин В.В., Карнаух В.Н. и др. Современные геологические процессы и условия формирования баритовой залежи в котловине Дерюгина Охотского моря // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 2. С. 200–214.

Астахова Н.В., Липкина М.И., Мельниченко Ю.И. Гидротермальная баритовая минерализация во впадине Дерюгина Охотское море // ДАН. 1987. Т.295. № 1. С. 212–215.

Ахманов Г.Г. Егорова И.П., Михайлик П.Е. и др. К генезису травертиноподобных баритов впадины Дерюгина (Охотское море) // Отечественная геология. 2015. № 1. С. 82–88.

Безруков П.Л., Лисицын А.П. Осадкообразование в дальневосточных морях в четвертичное время // Труды комиссии по

изучению четвертичного периода. 1957. Т. 13. С. 377–385.

Блохин М.Г., Михайлик П.Е., Еловский Е.В. и др. Генезис баритов впадины Дерюгина (Охотское море) // Геология морей и океанов: Материалы 22-ой Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. II. М.: ИО РАН, 2017. С. 312–316.

Блохин М.Г., Михайлик П.Е., Еловский Е.В. и др. Первые данные об уровнях содержания редкоземельных элементов в баритах впадины Дерюгина (Охотское море) // Труды V Международной Научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU-2016». М.: Феория, 2016. С. 304–308.

Волохин Ю.Г. Мезозойское и кайнозойское кремненакопление в окраинных бассейнах востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2012. 434 с.

Богданов Ю.А. Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 2006. 527 с.

Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС, 2001. 500 с.

Деркачев А.Н., Борман Г., Грайнерт Й. и др. Аутигенная карбонатная и баритовая минерализация в осадках впадины Дерюгина (Охотское море) // Литология и полезные ископаемые. 2000. № 6. С. 568–585.

Деркачев А.Н., Николаева Н.А. Особенности аутигенноминералогинеза в осадках Охотского моря // Дальневосточные моря России. М.: ФГУП Издательство «Наука», 2007. С. 223–239.

Деркачев А.Н., Николаева Н.А., Горбаренко С.А. Особенности поставки и распределения кластогенного материала в Охотском море в позднечетвертичное время // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 1. С. 37–52.

Деркачев А.Н., Обжиров А.И., Борман Г. и др. Аутигенное минералообразование на участках проявления холодных флюидно-газовых эманаций на дне Охотского моря // В сборнике: Условия образования донных осадков и связанных с ними полезных ископаемых в окраинных морях. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 47–60.

Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 359 с.

Еловский Е.В. Математическое устранение спектральных помех при прямом определении редкоземельных элементов в природных водах методом квадрупольной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Масс-спектрометрия. 2015. Т. 12. № 2. С. 107–116.

Еловский Е.В., Михайлик П.Е. Сорбционные возможности смолы Lewatit TP 207 по

- отношению к аналитическому концентрированию (сопряженному и нет с масс-спектрометрическим с индуктивно связанной плазмой детектированием) иттрия и лантаноидов из растворов морских вод // *Материалы VII конференции молодых ученых: Океанологические исследования. Владивосток. Дальнаука, 2016. С. 214–216.*
- Иванов М.В., Леин А.Ю., Гальченко В.Ф. и др.* Биогеохимия цикла углерода в районе метановых газовыделений Черного моря // *Доклады академии наук. 1991. Т. 320. С. 1235–1245.*
- Левитан М.А., Лукша В.Л., Толмачева А.В.* История седиментации в северной части Охотского моря в течении последних 1.1 млн лет // *Литология и полезные ископаемые. 2007. № 3. С. 227–246.*
- Михайлик П.Е., Еловский Е.В., Михайлик Е.В. и др.* Редкоземельные элементы как индикатор источников марганца в поверхностных осадках котловины Дерюгина (Охотское море) // *Труды V Международной Научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU-2016». М.: Феория, 2016. С. 279–283.*
- Саттарова В.В., Зарубина Н.В., Блохин М.Г. и др.* Редкоземельные элементы в поверхностных осадках впадины Дерюгина Охотского моря // *Тихоокеанская геология. 2014. Т. 3. № 2. С. 109–117.*
- Aloisi G., Wallmann K., Bollwerk S.M., et al.* The effect of dissolved barium on biogeochemical processes at cold seeps // *Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004. V. 68. № 8. P. 1735–1748.*
- Baioumy H.M.* Rare earth elements, S and Sr isotopes and origin of barite from Bahariya Oasis, Egypt: Implication for the origin of host iron ores // *Journal of African Earth Sciences. 2015. V. 106. P. 99–107.*
- Binns R.A., Parr J.M., Gemmell J.B. et al.* Precious metals in barite—silica chimneys from Franklin Seamount, Woodlark Basin, Papua New Guinea // *Marine Geology. 1997. V. 142. № 1–4. P. 119–141.*
- Bollwerk S.* Reizente submarine Barytbildung im Derugin Becken (Ochotskisches Meer): geochemische Prozesse an activen Fluidaustrittsstellen. Kiel: GEOMAR, 2002. 130 p.
- Brumsack H.J.* The inorganic geochemistry of Cretaceous black shales (DSDP Leg 41) in comparison to modern upwelling sediment from the Gulf of California / Summerhayes, C.P., Shackleton, N.J. (Eds.), *North Atlantic Paleooceanography. Geological Society. London. Special Publication, 1986. V. 21. P. 447–462.*
- Cruise Reports: KOMEX I and II. RV Professor Gagarinsky. Cruise 22. RV Akademik Lavrentiev Cruise 28. Biebow N., Hutten E. (edit.) // *GEOMAR Report. 82. Kiel, 1999. 301 p. (https://oceanrep.geomar.de/24181/).*
- Cruise Reports: KOMEX V and VI. RV Professor Gagarinsky Cruise 26. MV Marshal Gelovany Cruise 1. Biebow N., Ludmann T., Karp B., Kulinich R. (edit.) // *GEOMAR Report. 88. Kiel, 2000. 308 p. (https://oceanrep.geomar.de/28758/).*
- Cruise Reports: KOMEX. RV Professor Gagarinsky. Cruise 32. Ludmann T., Baranov B., Karp B. (Eds.) // *GEOMAR Report. 105. Kiel, 2002. 52 p. (http://oceanrep.geomar.de/27386/).*
- Fagel N., Andre L., Debrabant P.* Multiple seawater-derived geochemical signatures in Indian oceanic pelagic clays // *Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997. V. 61. № 5. P. 989–1008.*
- Gonzalez-Munoz M., Martinez-Ruiz F, Morcillo F. et al.* Precipitation of barite by marine bacteria: a possible mechanism for marine barite formation // *Geology. 2012. V. 40. № 8. P. 675–678.*
- Greiner J., Bollwerk S.M., Derkachev A. et al.* Massive barite deposits and carbonate mineralization in the Derugin Basin, Sea of Okhotsk: Precipitation processes at cold seep sites // *Earth and Planetary Science Letters. 2002. V. 203. № 1. P. 165–180.*
- Griffith E.M., Paytan A.* Barite in the ocean—occurrence, geochemistry and palaeoceanographic applications // *Sedimentology. 2012. V. 59. № 6. P. 1817–1835.*
- Guichard F., Church T.M., Treuil M. et al.* Rare earth in barites: distribution and effects on aqueous partitioning // *Geochimica et Cosmochimica Acta. 1979. V. 43. № 7. P. 983–997.*
- Hein J.R., Zierenberg R.A., Maynard J.B. et al.* Multifarious barite-forming environments along a rifted continental margin, Southern California Borderland // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2007. V. 54. № 11–13. P. 1327–1349.*
- Martin E.E., Macdougall J.D., Herbert T.D. et al.* Strontium and neodymium isotopic analyses of marine barite separates // *Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59. № 7. P. 1353–1361.*
- McLennan S.M.* Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry. 1989. V. 21. № 1. P. 169–200.*
- Monnin C., Balleur S., Goffé B.* A thermodynamic investigation of barium and calcium sulfate stability in sediments at an oceanic ridge axis (Juan de Fuca, ODP legs 139 and 169) // *Geochimica et Cosmochimica Acta. 2003. V. 67. № 16. P. 2965–2976.*
- Naehr T.H., Stakes D.S., Moore W.S.* Mass wasting, ephemeral fluid flow, and barite deposition on the California continental margin // *Geology. 2000. V. 28. № 4. P. 315–318.*

- Paytan A., Mearon S., Cobb K. et al.* Origin of marine barite deposits: Sr and S isotope characterization // *Geology*. 2002. V. 30. № 8. P. 747–750.
- Sverjensky D.A.* Europium redox equilibria in aqueous solution // *Earth and Planetary Science Letters*. 1984. V. 67. № 1. P. 70–78.
- Torres M.E., Brumsack H.J., Bohrmann G. et al.* Barite fronts in continental sediments: a new look at barium remobilization in the zone of sulfate reduction and formation of heavy barites in authigenic fronts // *Chemical Geology*. 1996. V. 127. № 1–3. P. 125–139.
- Vanneste H., James R.H., Kelly-Gern B.A. et al.* Authigenic barite records of methane seepage at the Carlos Ribeiro mud volcano (Gulf of Cadiz) // *Chemical Geology*. 2013. V. 354. P. 42–54.

GENESIS OF THE DERYUGIN DEPRESSION BARITES (THE SEA OF OKHOTSK)

**M.G. Blokhin¹, V.V. Ivin³, P.E. Mihailik^{1,2}, E.V. Mikhailik¹, Yu.M. Ivanova¹,
E.V. Elovsky¹, N.V. Zarubina¹, V.V. Ivanov¹, D.S. Ostapenko¹**

¹*Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok;*

²*Far Eastern Federal University, Vladivostok;*

³*National Scientific Center of Marine Biology FEB RAS, Vladivostok;*

In order to reveal the genesis of barites, the authors identified content and distribution regularities of rare-earth elements in barites from the Deryugin Depression, the Sea of Okhotsk. The obtained data show that a hydrothermal component does not affect the formation of the barites. Sea water is the source of the rare-earth elements, and their composition apparently corresponds to the composition of cold sipes.

Keywords: barites, rare earth elements, Deryugin Depression, Sea of Okhotsk.