

УДК 550.42+550.43

Р.Б.ШАКИРОВ, А.В.СОРОЧИНСКАЯ, А.И.ОБЖИРОВ, Н.В.ЗАРУБИНА

Газогеохимические особенности осадков Восточно-Сибирского моря

Представлены новейшие результаты газогеохимических исследований донных осадков Восточно-Сибирского моря по материалам 45-го рейса НИС «Академик М.А.Лаврентьев». Впервые на профиле длиной 550 км, пересекающем все море от мыса Биллингса к хребту Менделеева, детально показаны основные особенности распределения газогеохимических и гранулометрических параметров, элементного состава и содержания органического углерода в поверхностном слое осадков, а также их взаимосвязи. Выбранный комплекс параметров представителью характеризует специфические геохимические условия формирования газового и геохимического облика осадков данного бассейна. По газогеохимическим измерениям выделена зона разгрузки природного газа, которая контролируется неотектоническим разломом. Отмечено, что уровни обнаруженных аномальных концентраций метана (до 2,5% об.) характерны для районов образования газогидратов. Полученные геохимические характеристики газа и элементного состава донных осадков являются критериями прогноза залежей углеводородов. Кроме того, актуальность данной работы обусловлена приоритетом исследований в арктической зоне Российской Федерации.

Ключевые слова: газогеохимия, Восточно-Сибирское море, метан, углеводородные газы, гранулометрия, элементный состав, органический углерод, тектоника.

Gas-geochemical features of sediments in the East-Siberian Sea. R.B.SHAKIROV, A.V.SOROCHINSKAJA, A.I.OBZHIROV (V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok), N.V.ZARUBINA (Far Eastern Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

Geochemical survey of bottom sediments was conducted across the East-Siberian Sea in 45-th Cruise, 2008 on RV «Academic M.A.Lavrent'ev». The main features of distribution of gas-chemical and granulometric parameters, ultimate composition and the organic carbon content in the upper layer of sediments and also correlation of these parameters were shown in details. On the results of gas-geochemical observations, natural gas discharge zone was determined that was under control of neo-tectonic fault. Hydrocarbon gases have probably mixed genesis. The content of some chemical elements in the studied sediments exceeds their average content in sedimentary rocks of the continents.

Key words: gasgeochemistry, the East-Siberian Sea, methane, hydrocarbon gases, granulometry, element composition, organic carbon, tectonics.

Открытия крупных месторождений нефти и газа в Баренцевом и Карском морях, а также около 40 месторождений на северной Аляске в непосредственной близости от российской экономической зоны сделали Чукотское и Восточно-Сибирское моря предметом пристального изучения. Из морей российской Арктики Восточно-Сибирское наименее изучено из-за суровых климатических условий и продолжительности ледового периода. Среди арктических морей оно самое мелководное: 72% акватории имеет глубину менее 50 м, глубины менее 30 м занимают половину площади моря. Другая его особенность заключается в том, что на обширном приконтинентальном шельфе сохраняется устойчивая седиментогенная обстановка, поэтому донные осадки повсеместно имеют

ШАКИРОВ Ренат Белалович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, СОРОЧИНСКАЯ Анна Васильевна – научный сотрудник, ОБЖИРОВ Анатолий Иванович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН, Владивосток), ЗАРУБИНА Наталья Владимировна – научный сотрудник (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток). E-mail: ren@poi.dvo.ru

Финансирование экспедиции осуществлено «Севморгео». Работа поддержана грантами ДВО РАН 09-1-П17-10, 10-III-B-07-191, 09-III-B-07-372, 09-III-A-07-324; фонда «Глобальная Энергия» МГ2010/04/6 и ФЦП № 02.740.11.0022.

тонкозернистую структуру [13]. В работе представлены материалы, полученные геолого-геофизической экспедицией на НИС «Академик М.А.Лаврентьев» в июле–сентябре 2008 г., в которой принимали участие сотрудники Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева ДВО РАН и ФГУНПП по морским геологоразведочным работам «Севморгео».

Материалы и методы

По региональному профилю (550 км длиной), протянувшемуся с юга на север от мыса Биллингса к подводному хр. Менделеева, включившему 56 пикетов на глубинах 19–200 м, через 10 км произведен отбор литологического материала (жерна до 2,5 м) с последующим описанием и изучением особенностей распределения концентраций углеводородных газов в толще донных осадков (рис. 1). Отбор проб донных осадков проводили

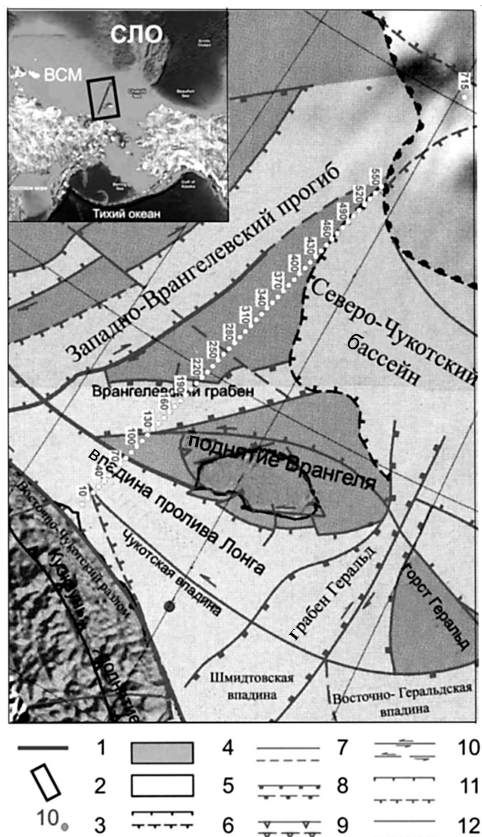


Рис. 1. Карта-схема района исследований. Расположение пикетов опробования донных осадков Восточно-Сибирского моря на карте неотектонических структур [12]. СЛО – Северный Ледовитый океан; ВСМ – Восточно-Сибирское море. 1 – профиль работ 2008 г.; 2 – полигон работ; 3 – пикеты опробования; 4 – поднятия и горсты, впадины; 5 – грабены, рампы; 6 – границы достоверные / предполагаемые (штрихи направлены в сторону впадин). Новейшие разломы (главные показаны утолщенными линиями): 7 – достоверные / предполагаемые; 8 – сбросы; 9 – взбросы; 10 – сдвиги; 11 – неустановленного типа; 12 – без установленного смещения

ударной прямооточной трубкой с вкладышем длиной 4 м, внутренним диаметром 9 см, а также дночерпателем «Океан-2». После подъема осадка на борт содержание метана и тяжелых углеводородных газов (ТУВГ) устанавливали тремя различными методами: равновесных концентраций, вакуумной и термовакuumной дегазации [18]. Газ из осадка предварительно десорбировался в ультразвуковой ванне в течение 2–4 ч. Метан и другие углеводородные газы (предельные и непредельные гомологи до пентана включительно) определяли на газовом хроматографе «Кристалл-Люкс 4000М» с модулем 1ДИП/2ДИП. Для калибровки применяли газовые стандарты с концентрациями метана 10, 100, 1000 ppm, и 1% CO₂, этана («SCOTTY», ALLTECH GmbH, Германия). Ошибка определения составляла не более 5%. В университете Хоккайдо (Япония) методом высокоразрешающей масс-спектрометрии (GC/MS) выполнены анализы изотопного состава углерода метана и этана. Для характеристики осадков, в которых определялись углеводородные газы, в стационарных условиях определен гранулометрический состав поверхностного слоя осадков, его элементный состав и содержание в нем органического углерода.

Гранулометрический анализ осадков выполнен лазерно-дисперсионным методом на установке «Microtrac-100» в лаборатории гранулометрии Тюменского отделения «СургутНИПИнефть». При определении элементного состава (валового содержания) донных отложений в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН применяется следующая аналитическая схема:

для основных (матричных) элементов (Ti, Fe, Ca, Mg, Mn, K, Na) – метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES), для примесных элементов (Li, Sc, V, Co, Cr, Cu, Ni, Zn, Rb, Sr, Y, Cd, Cs, Ba, REE, Hf, Pb, Th, Pb, U) – метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Исследуемые образцы предварительно высушивали при 105°C до постоянного веса. Навеску анализируемой пробы (0,05 г) помещали в тefлоновый бюкс, добавляли смесь кислот HF, HNO₃, HClO₄ в отношении 2,5 : 1 : 0,5, и содержимое бюкса упаривали до влажных солей. Такую процедуру проводили дважды. После упаривания последовательно обрабатывали пробу деионизированной водой, HNO₃ и H₂O₂ и снова упаривали до влажных солей. Полученные растворы переносили в мерные полипропиленовые колбы на 50 мл и доводили до метки деионизированной водой. Фактор разбавления составляет 1000. Из растворов отбирали аликвотные части по 10 мл для последующего исследования методами ICP-OES и ICP-MS. Правильность определения содержания элементов подтверждена анализом СОС (стандартный образец состава) осадочных отложений: глины терригенной ООПЕ101, ила вулканотерригенного ООПЕ201, ила кремнистого ООПЕ402 и международного стандарта – базальта JB-3 (Япония).

Содержание органического углерода определяли на анализаторе типа TOC-V_{CPN} с приставкой для сжигания твердых проб SSV-5000A фирмы «SHIMADZU» в лаборатории физико-химического анализа ТОИ ДВО РАН. В основу принципа действия анализатора положен метод измерения поглощения инфракрасного излучения двуокисью углерода, образующейся при сжигании органических и неорганических соединений. При определении ТС относительное стандартное отклонение составило 1,2%, IC – 1,7%.

Результаты и обсуждение

Газогеохимические исследования. Газогеохимическая съемка методом равновесных концентраций в донных осадках по профилю позволила охарактеризовать особенности распределения углеводородных газов. Обнаружены аномалии метана, в осадках зафиксированы предельные и непредельные углеводородные газы (рис. 2). Метан установлен во всех газовых пробах из донных отложений в концентрациях от 2,0 ppm до 2,4%. Отмечается общая закономерность возрастания концентраций метана вниз по разрезу керна с различным градиентом, косвенно отражающим газонасыщенность осадков. Высокое содержание метана отмечается на всем протяжении профиля (рис. 3). В центральной части профиля выделен участок разгрузки метана (2,4 объем. %) в концентрациях, достаточных для формирования газогидратов (рис. 3). ТУВГ в донных отложениях представлены этаном,

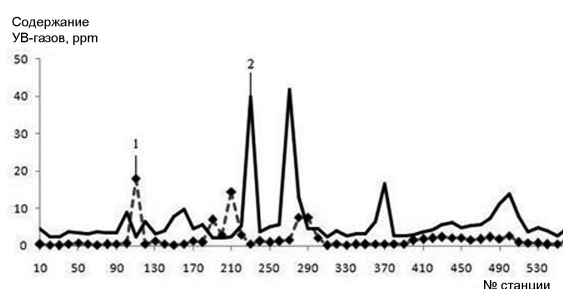


Рис. 2. Содержание углеводородных газов в поверхностном слое осадков по профилю. 1 – Σ ТУВ (сумма тяжелых углеводородных газов); 2 – CH₄

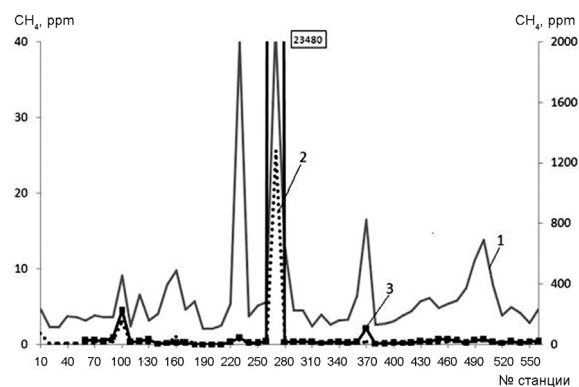


Рис. 3. Распределение метана в осадках по профилю в интервале 0–5 см (1); 30–50 см (2); 80–120 см (3)

этиленом, пропиленом, пропаном, бутаном и пентаном. Этилен в составе природного газа донных отложений обнаружен практически во всех отобранных газовых пробах, концентрации варьируют от 0,06 до 80 ppm. Этан уверенно определен в 98% отобранных проб и почти всегда – вместе с этиленом, максимальное значение (0,43 ppm) отмечено на станции 470, горизонт 90 см. Пропилен фиксируется во всех пробах, max 0,61 ppm. Пропан установлен в 70% проб, max 0,33 ppm. Бутан обнаружен в 60% проб, главным образом в северной части профиля, max 0,7 ppm (ст. 490, горизонт 65 см). Пентан определен в северной части профиля, max 17 ppm (ст. 110). Результаты изотопных исследований углерода метана и этана, извлеченных из осадков в различных участках профиля, выявили преобладание термогенной компоненты в районе исследований. Изотопный состав углерода метана составил от $-27,7$ до $-72,2$ ‰ PDB (в среднем $-56,6$ ‰ PDB); этана от $-17,0$ до $-31,8$ (в среднем $-25,7$ ‰ PDB). Представленные значения характерны для угленосных, нефтегазосных и газогидратосных осадочных формаций северо-востока России.

Гранулометрический анализ. Для интерпретации результатов гранулометрического анализа использовали трехкомпонентную классификацию по соотношению содержания фракций псаммита (1–0,1 мм), алеврита (0,1–0,01 мм) и пелита (< 0,01 мм), предложенную в работе [11]. Основной тип осадка по профилю – алеврит пелитовый. На станциях 190, 200, 210 осадок представлен алевритом псаммитовым, а на более удаленных от берега – пелитом алевритовым (рис. 4). Значительные содержания пелитовой фракции (21–72%) присутствуют во всех пробах по профилю. Это объясняется подледно-морскими условиями седиментации, характерными для Восточно-Сибирского моря, которое почти круглый год покрыто сплошным льдом, из-за чего основным процессом осадконакопления является гравитационное осаждение глинистых частиц [8, 13]. Содержание алевритовой составляющей в осадках по профилю колеблется в пределах 26–58%, псаммитовой – 0–36%.

Распределение органического углерода. Концентрации $C_{орг}$ в пробах донных осадков находятся в пределах 0,29–2,27% от сухого вещества осадка (среднее – 1,6%) (рис. 4), что согласуется с данными предыдущих исследований [1, 5, 17]. Содержание $C_{орг}$ коррелирует с количеством пелита в осадке. Осадки на меридиональном профиле представлены бескарбонатными разностями (значения $C_{карб}$ варьируют от 0 до 0,06%, величины 0,02–0,06% отмечены в северной части профиля). Малый вклад неорганического углерода в осадках – характерная черта донных отложений арктических морей. Низкое содержание $C_{карб}$ в осадках обусловлено особенностями полярного биоценоза и его биотипа [17]. Слабая корреляция между $C_{орг}$ и содержанием

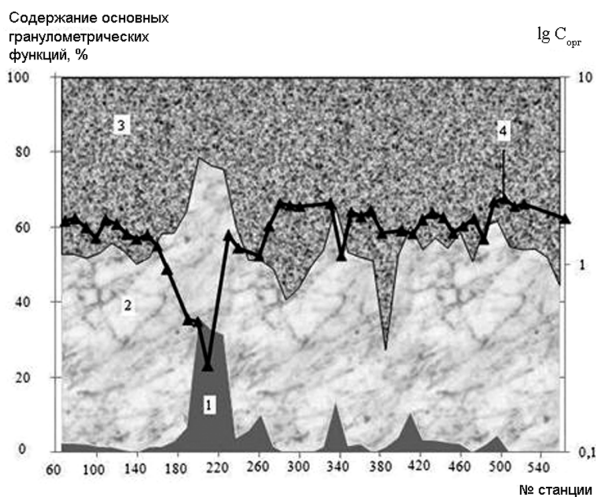


Рис. 4. Диаграмма гранулометрического состава поверхностного слоя осадков по профилю и вариации $C_{орг}$ (логарифмическая шкала): 1 – псаммит; 2 – алеврит; 3 – пелит; 4 – $C_{орг}$

метана говорит о незначительном расходе органического вещества при формировании газовой фазы и позволяет предположить смешанный генезис метана в осадках.

Распределение химических элементов. Результаты определения элементного состава осадков поверхностного слоя по профилю показывают, что по отношению к среднему содержанию в осадочных породах континентов [14] исследуемые осадки обогащены Na в 4–8 раз, Fe в 1,5 раза, Ag в 1,3–2 раза (табл. 1, 2). Отмечается повышение концентраций на отдельных станциях для Mn

Содержание элементов в поверхностном слое осадков по профилю

Элемент	Станция																	Среднее в осадочных породах континентов [14]										
	70	90	100	110	120	130	160	200	230	240	260	270	280	290	300	330	350		370	380	410	440	470	500	520	560		
Масс. %																												
Ti	0,34	0,35	0,35	0,34	0,35	0,35	0,32	0,23	0,32	0,32	0,29	0,34	0,31	0,34	0,33	0,32	0,32	0,32	0,38	0,32	0,33	0,34	0,33	0,32	0,32	0,32	0,32	0,45
Fe	3,47	3,71	3,78	3,71	3,90	3,64	3,17	1,62	3,46	3,09	3,10	4,58	4,37	4,50	4,17	5,15	4,40	4,59	4,51	3,50	3,76	3,79	4,66	4,55	4,73	4,73	3,33	
Ca	1,04	1,08	0,95	1,04	1,06	1,00	0,85	0,81	0,89	0,83	0,79	0,81	0,93	0,91	1,00	1,08	1,13	1,05	0,86	1,03	1,08	1,06	0,99	1,05	1,01	2,53		
Mg	1,28	1,31	1,28	1,31	1,29	1,29	1,03	0,54	1,10	1,12	1,03	1,51	1,55	1,56	1,47	1,53	1,49	1,40	1,29	1,25	1,32	1,33	1,86	1,79	1,88	1,34		
K	1,80	1,83	1,86	1,79	1,81	1,82	1,71	1,40	1,77	1,77	1,79	1,96	1,91	1,92	1,81	1,83	1,81	2,18	2,66	2,19	2,20	2,18	2,45	2,43	2,60	2,28		
Na	2,77	2,58	2,57	2,56	2,44	2,69	2,39	1,90	2,61	2,73	2,51	3,48	3,46	3,29	3,30	3,46	3,33	2,83	2,12	2,53	2,23	2,48	4,05	3,78	5,13	0,66		
Mn	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	0,27	0,72	0,32	0,32	0,07	
г/т																												
Li	37,49	40,97	38,99	37,60	37,91	37,71	33,31	20,06	34,53	34,60	31,67	43,32	40,80	40,81	38,28	37,41	35,66	42,73	57,09	38,81	41,44	40,15	48,58	47,97	53,97	60		
Sc	6,24	12,60	11,96	11,68	12,09	11,73	10,15	5,50	10,63	10,62	9,55	13,48	12,66	13,20	12,54	12,42	11,94	12,92	14,97	11,18	12,30	12,18	14,04	13,48	15,51	10		
V	125,9	146,6	136,3	142,7	145,0	140,5	121,2	59,8	130,1	136,1	122,6	188,9	179,8	183,9	173,5	189,0	175,3	177,2	157,8	159,8	173,3	165,2	215,8	214,2	276,8	130		
Cr	67,56	73,10	68,09	67,66	71,62	68,71	59,23	31,23	58,80	61,85	54,64	81,59	77,78	82,74	76,16	75,29	73,08	76,38	73,26	66,30	72,94	70,96	79,19	74,82	82,17	100		
Co	8,42	9,95	9,18	8,71	8,95	8,82	8,09	4,81	8,17	7,74	7,37	9,37	9,14	9,58	9,26	10,7	9,91	10,6	13,26	9,81	10,62	11,81	25,55	29,36	34,02	20		
Ni	25,94	28,05	28,50	27,82	27,96	27,87	30,96	11,59	27,45	26,52	22,29	30,91	29,08	29,98	28,93	29,23	29,39	39,88	45,96	38,48	35,41	46,60	45,02	49,17	67,11	95		
Cu	13,50	16,71	16,54	15,94	16,89	15,43	13,34	7,23	14,64	14,79	13,19	18,87	20,07	18,48	18,42	18,52	17,89	20,51	46,78	18,71	17,50	16,77	21,68	22,57	32,45	57		
Zn	90,60	88,44	100,7	92,93	93,17	92,17	84,09	61,22	88,48	89,42	84,23	107,6	101,1	103,5	96,94	96,06	93,46	91,74	109,1	88,37	91,79	90,75	102,2	100,6	118,4	200		
Rb	166,2	185,5	165,1	168,1	194,3	176,5	169,0	167,8	177,7	161,5	150,9	159,5	156,0	160,6	171,4	197,7	187,8	171,0	177,9	174,8	171,5	161,7	158,8	177,0	450			
Ba	665,3	694,1	662,8	664,7	690,7	693,2	686,0	575,3	668,9	659,2	621,9	691,9	670,8	106,2	683,4	674,7	677,4	697,0	652,4	660,0	671,4	661,8	633,9	608,7	661,6	800		
Ag	0,14	0,18	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16	0,12	0,19	0,18	0,18	0,21	0,18	0,17	0,18	0,15	0,16	0,20	0,18	0,15	0,15	0,16	0,21	0,18	0,20	0,1		
Cs	5,6	6,03	5,71	5,65	5,78	5,73	4,91	2,59	5,09	5,45	4,94	7,17	6,79	6,82	6,26	6,25	5,85	5,87	6,99	5,19	5,67	5,55	6,76	6,67	8,16	12		
Hf	1,71	2,40	2,22	2,12	2,28	2,37	2,23	1,68	2,26	2,18	1,93	2,31	2,02	2,16	2,24	2,14	1,93	2,08	2,30	1,88	2,12	2,08	2,15	2,00	2,23	6		
Pb	12,72	18,73	15,25	14,51	14,74	14,54	12,86	9,64	13,37	13,79	13,25	17,48	16,47	16,23	16,7	17,57	16,8	19,12	19,91	15,42	16,57	15,34	18,81	18,45	19,78	20		
Th	7,81	8,75	8,18	8,06	8,42	8,34	8,06	5,57	7,64	7,58	6,94	8,77	7,99	8,38	8,22	7,78	7,73	8,09	8,86	7,47	7,99	8,06	8,37	8,19	8,96	11		
U	2,03	2,78	2,44	2,64	3,33	2,06	1,81	1,18	1,68	2,39	1,78	1,81	2,00	1,95	1,94	2,02	2,09	2,21	2,83	2,53	2,56	2,51	2,32	2,11	3,43	3,2		

Содержание РЗЭ и У в поверхностном слое осадков по профилю, г/т

Элемент	Станция																			NASC [7]						
	70	90	100	110	120	130	160	200	230	240	260	270	280	290	300	330	350	370	380		410	440	470	500	520	560
Y	13,45	17,17	16,69	15,57	16,21	15,99	15,33	11,84	16,20	15,32	14,29	16,59	15,60	16,27	16,13	16,05	15,64	16,21	18,36	15,24	15,44	16,16	15,91	15,28	16,46	30
La	22,76	24,97	22,80	23,04	24,84	23,27	24,05	19,60	23,10	22,56	20,59	22,10	20,57	21,65	22,67	20,84	21,59	22,49	26,11	23,36	23,88	24,21	22,93	22,32	23,46	32
Ce	47,37	53,66	48,59	48,16	52,59	48,78	50,32	41,44	48,37	47,53	42,97	46,77	42,82	46,01	46,95	44,01	45,63	47,67	55,61	48,88	50,52	51,03	49,29	49,04	49,59	73
Pr	5,45	6,31	5,80	5,74	6,11	5,79	5,99	4,83	5,81	5,70	5,16	5,54	5,11	5,49	5,61	5,24	5,41	5,77	6,73	5,86	6,06	6,09	5,81	5,74	5,98	7,9
Nd	17,65	24,65	22,78	22,05	24,12	22,65	23,69	18,51	22,58	22,50	20,57	22,36	20,07	21,44	21,93	20,44	21,42	22,26	26,10	22,76	24,01	24,23	23,19	22,69	24,31	33
Sm	4,45	4,99	4,74	4,61	5,03	4,70	4,75	3,68	4,67	4,66	4,32	4,72	4,34	4,49	4,63	4,44	4,64	4,60	5,40	4,38	4,68	4,83	4,75	4,48	4,90	5,7
Eu	0,89	0,98	0,95	0,89	0,94	0,94	0,94	0,71	0,91	0,92	0,85	0,93	0,86	0,94	0,92	0,85	0,91	1,08	1,21	1,03	1,07	1,09	1,09	1,03	1,13	1,24
Gd	4,00	4,52	4,15	4,08	4,21	4,09	4,09	3,17	4,07	3,94	3,65	4,23	3,74	4,10	3,97	3,96	4,09	4,42	4,93	4,22	4,46	4,46	4,39	4,32	4,64	5,2
Tb	0,55	0,62	0,60	0,55	0,60	0,58	0,58	0,43	0,58	0,56	0,52	0,59	0,54	0,60	0,57	0,56	0,55	0,65	0,73	0,59	0,62	0,61	0,63	0,61	0,64	0,85
Dy	3,35	3,40	3,41	3,22	3,29	3,31	3,15	2,50	3,16	3,08	2,89	3,40	3,13	3,32	3,28	3,17	3,19	3,47	3,81	3,18	3,40	3,52	3,27	3,38	3,71	5,2
Er	1,72	1,98	1,89	1,83	1,97	1,77	1,80	1,34	1,82	1,68	1,55	1,93	1,75	1,91	1,95	1,83	1,84	1,90	2,11	1,66	1,82	1,86	1,90	1,82	1,97	3,4
Tm	0,25	0,29	0,26	0,26	0,26	0,25	0,26	0,19	0,26	0,26	0,23	0,27	0,24	0,27	0,26	0,26	0,25	0,31	0,31	0,24	0,27	0,27	0,32	0,26	0,32	0,5
Yb	1,59	1,75	1,78	1,64	1,76	1,70	1,61	1,22	1,73	1,58	1,56	1,74	1,67	1,61	1,75	1,69	1,65	1,86	2,03	1,62	1,81	1,81	1,79	1,68	2,02	3,1
Lu	0,23	0,25	0,24	0,24	0,25	0,24	0,23	0,18	0,25	0,23	0,20	0,24	0,24	0,25	0,26	0,24	0,24	0,30	0,28	0,23	0,25	0,26	0,26	0,24	0,27	0,48

(в 4–10 раз), Cu (в 8 раз), Zn (в 2 раза). Содержания в осадках Mg, Sc, V, Pb близки к среднему содержанию этих элементов в осадочных породах континентов, а для Rb, Cs, Li, K, Ca, Sr, Ba, U, Th, Ti, Hf коэффициенты концентрирования меньше единицы.

В осадках поверхностного слоя щелочных элементов Li, Rb, Cs, K меньше, чем в среднем в осадочных породах континентов, но больше Na. Содержание щелочных элементов контролируется вариациями пелитовой фракции. Повышенные содержания Na связывают как с его вхождением в кристаллические решетки глинистых минералов, так и с экстракцией этого элемента фитопланктоном [9].

Распределение и содержание щелочноземельных Ca, Mg и Sr в морских осадках связано с карбонатной составляющей, так как эти элементы, изоморфно замещая друг друга, являются основными катионами карбонатных минералов. Поверхностный слой осадков по профилю обеднен Ca и Sr, что характерно для осадков высоких широт, представленных в основном диатомовыми илами [6]. Содержание Mg и Ba близко к их среднему содержанию в осадочных породах континентов. С увеличением пелитовой составляющей отмечается увеличение Mg в осадке, связанное с его сорбцией глинистыми частицами. Отмечается хорошая корреляция $C_{орг}$ с Mg и Ba, так как эти элементы усваиваются фитопланктоном в процессе жизнедеятельности и высвобождаются при его отмирании [6, 15].

Для элементов группы железа и тяжелых металлов характерна высокая степень корреляции с $C_{орг}$, так как они способны образовывать стойкие металлоорганические комплексы с гумусовыми кислотами – одними из основных составляющих органического вещества [2, 10]. Содержание Fe, V, Sc, Zn по профилю в 1,5–2 раза выше среднего содержания этих элементов в осадочных породах континентов,

минимальные значения приходятся на станции, где в осадке наименьшие количества пелита и $C_{\text{орг}}$. Для Cr, Co, Mn, Ti коэффициенты концентрирования ниже единицы, содержание Pb в осадках сопоставимо со средним содержанием этого элемента в осадочных породах континентов.

Содержание Mn и Cu в поверхностном слое осадков резко увеличивается на станциях, для которых в осадках характерны максимальные значения пелитовой составляющей (50–70%) и $C_{\text{орг}}$ (1,5–2,3%) (рис. 5). Кроме того, вблизи этих станций в осадках зафиксированы газовые аномалии (3–4-кратное превышение фона). Такие факторы сопровождают процессы деструкции органического вещества и способствуют диагенетическому перераспределению Mn. В осадке все формы марганца восстанавливаются до Mn^{2+} , растворимой подвижной формы: $MnO_2 + C_{\text{орг}} \rightarrow Mn^{2+} + CO_2$. За пределами зон газовых аномалий идет обратный процесс с образованием нерастворимых оксигидроксидов Mn^{+4} [6, 16]. Одним из важнейших осадителей халькофильных Cu и Zn является сероводород, образующийся при разложении органического вещества. Кроме того, с увеличением доли пелитовой компоненты увеличивается количество глинистых минералов, которые являются сорбентами этих элементов [16].

Содержание U, Th и Hf в поверхностном слое осадков по профилю ниже средних содержаний этих элементов в осадочных породах континентов. Th и Hf поступают в донные осадки со взвешенными частицами, а также легко сорбируются гидроксидами железа и органическим веществом [6]. Уран в морской воде находится в растворенной форме, в осадок может поступать в виде нерастворимых уранатов, образовавшихся в результате гидролиза $(UO_2)(CO_2)_3^{-4}$ [6], а также органоминеральных комплексов. Минимальное содержание U, Th и Hf в осадках обнаружено на станциях с минимальным количеством пелита и $C_{\text{орг}}$. При изучении распределения РЗЭ в осадках их содержания (табл. 2) были стандартизированы по составу РЗЭ в североамериканском сланце (NASC) [7].

С увеличением доли пелитовых фракций в осадке увеличивается содержание РЗЭ, так как растет сорбционная поверхность частиц. РЗЭ коррелируют с $C_{\text{орг}}$ и Fe, что связано со свойствами лантаноидов аккумулироваться оксидами Fe и органическим веществом [7]. Среднее содержание легких РЗЭ в осадках по профилю – 78%, тяжелых – 22%. Накопление в донных отложениях легких лантаноидов связано с существенно более высокими скоростями миграции для растворимых комплексных соединений тяжелых РЗЭ по сравнению с таковыми для соединений легких РЗЭ [3].

Коэффициент концентрирования серебра в осадках по профилю равен 1,3–2. Одной из причин обогащения осадков серебром следует считать его способность сорбироваться гуминовыми кислотами, которые по отношению к ионам серебра выступают как природный комплексообразующий сорбент с образованием труднорастворимых гуматных комплексов [4].

Коэффициент концентрирования серебра в осадках по профилю равен 1,3–2. Одной из причин обогащения осадков серебром следует считать его способность сорбироваться гуминовыми кислотами, которые по отношению к ионам серебра выступают как природный комплексообразующий сорбент с образованием труднорастворимых гуматных комплексов [4].

Выводы

Впервые в результате газогеохимических исследований в Восточно-Сибирском море охарактеризовано распределение предельных и непредельных углеводородных газов в донных отложениях по региональному профилю. В центральной части на

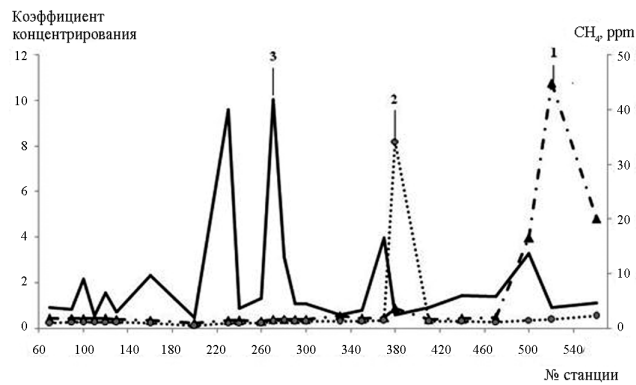


Рис. 5. Распределение в поверхностном слое осадков: 1 – Mn; 2 – Cu; 3 – CH_4

удалении 270 км от берега выделяется участок разгрузки природного газа (содержание метана 2,4% об.). Возникновение наиболее контрастных аномалий метана и ТУВГ связано, очевидно, с тектоническими разломами. Наличие углеводородных газов (до пентана) с характерными аномалиями в осадках на всем протяжении профиля и полученные данные изотопного состава углерода метана и этана позволяют считать континентальный шельф Восточно-Сибирского моря перспективным в отношении углеводородного потенциала.

Поверхностный слой осадков по профилю обеднен большинством изученных химических элементов. Распределение их содержания контролируется следующими факторами: гранулометрическим составом осадков – вариациями псаммитовой и пелитовой фракций; образованием органоминеральных комплексов, которые играют важную роль в концентрировании многих элементов; наличием в осадках аномалий метана, создающих специфические физико-химические условия и способствующих концентрированию ряда элементов (Mn, Cu).

Достаточно высокие содержания $C_{\text{орг}}$ в осадках по профилю согласуются с изменением гранулометрического состава осадков. Слабая корреляция между $C_{\text{орг}}$ и содержанием метана позволяет предположить смешанный генезис метана в осадках.

Авторы выражают благодарность заместителю директора ФГУНПП «Севморгео» д.г.-м.н. Г.И.Иванову и начальнику экспедиции А.А.Мережку за организацию и проведение экспедиционных исследований, всем участникам экспедиции – за работу в экстремальных условиях. Авторы благодарят Т.А.Коровину за помощь в определении гранулометрического состава осадков и ценные консультации. Научный коллектив экспедиции выражает признательность капитану НИС «Академик М.А.Лаврентьев» В.Н.Никифорову и команде за неоценимую помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биогеохимия органического вещества арктических морей. М.: Наука, 1982. 240 с.
2. Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кошечева И.Я. Геохимическая роль гумусовых кислот в миграции элементов // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 97-117.
3. Варшал Г.М., Кошечева И.Я., Сироткина И.О. и др. Изучение органических веществ поверхностных вод и их взаимодействие с ионами металлов // Геохимия. 1979. № 4. С. 598-607.
4. Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Баранова Н.Н. и др. Комплексообразование серебра с гумусовыми кислотами и геохимическая роль этого процесса. // Геохимия. 1994. № 8/9. С. 1287-1294.
5. Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2008. № 2. С. 183-195.
6. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 212 с.
7. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.
8. Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н., Боцул А.И. Седиментационные обстановки на приконтинентальном шельфе Восточно-Сибирского моря // Докл. АН. 2006. Т. 409, № 6. С. 822-827.
9. Дударев О.В., Боцул А.И., Аникиев В.В., Колесов Г.М. Современное осадкообразование в криолитозоне северо-западной части Анадырского залива (Берингово море) // Тихоокеан. геология. 2001. Т. 20, № 3. С. 12-25.
10. Лисицин А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735-747.
11. Лихт Ф.Р., Астахов А.С., Боцул А.И. и др. Структура осадков и фации Японского моря. Владивосток, 1983. 283 с.
12. Неотектонические структуры и активные разломы шельфа // Геология и полезные ископаемые шельфов России. Атлас. М.: Науч. мир, 2004. 108 с.
13. Павлидис Ю.А., Щербаков Ф.А. Современные донные осадки арктических морей Евразии // Океанология. 2000. Т. 40, № 1. С. 137-147.
14. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1979. 423 с.
15. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.
16. Розанов А.Г., Волков И.И. Донные осадки Кандакашского залива Белого моря: марганцевый феномен // Геохимия. 2009. № 10. С. 1067-1085.
17. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 300 с.
18. Хахенберг Х., Шмидт А. Газохроматографический анализ равновесной паровой фазы. М.: Мир, 1979. 160 с.