

С.П. Плетнев ¹, Ю. Ву ², В.К. Аннин ¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Владивосток

² Первый Океанографический институт, КНР

БИОИНДИКАЦИЯ МЕТАНОВЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФОРАМИНИФЕР И ИЗОТОПИИ ИХ РАКОВИН (ОХОТСКОЕ МОРЕ)

*Рассмотрены возможности использования фораминифер в качестве биоиндикаторов метановых экосистем. Проведен анализ видового состава и количественного распределения раковин планктонных и бентосных фораминифер из поверхностного слоя осадков, отобранных на 18 станциях островного склона Восточного Сахалина в интервале глубин 600—1500 м. Показано, что в местах активного выхода метана падает численность раковин планктонных и бентосных фораминифер, а также снижается их видовое разнообразие. В составе бентосных фораминифер метановых экосистем доминируют раковины карбонатных видов *Uvigerina peregrina parvocostata*, *Valvulineria sadonica*, *Nonionellina labradorica* и агглютинирующего *Reophax dentaliniformis*. В первых трех видах изучено соотношение изотопов кислорода и углерода в карбонате их раковин. Результаты изотопного анализа углерода указывают, что наиболее вероятным индикатором метана может быть вид *Valvulineria sadonica*.*

Ключевые слова: бентосные и планктонные фораминиферы, изотопы кислорода и углерода, метан, Охотское море

Введение

Открытие в последние годы огромных запасов метана в зонах вечной мерзлоты и на дне океанов дает основание полагать, что внезапные выбросы газа в атмосферу могли приводить к глобальным экологическим катастрофам. Именно с этими процессами связывают массовое вымирание и внезапное изменение климата в конце пермского периода, начале эоцена и в конце последней ледниковой эпохи [14, 15, 18]. В качестве одного из весомых доказательств являются результаты изотопного анализа углерода, которые фиксируют резкий негативный сдвиг $\delta^{13}\text{C}$ в раковинах карбонатных фоссилий в периоды высокого содержания метана в гидросфере и атмосфере [15].

По мнению академика Е.Ф. Шнюкова на 93 % площади Мирового океана в его донных отложениях присутствуют природные газогидраты [10]. Современными оценками потока метана из океана в

© С.П. ПЛЕТНЕВ, Ю. ВУ, В.К. АННИН, 2014

атмосферу невелики, так как происходит его перехват и окисление метанотрофными бактериями [3]. За счет микробиологических и химических процессов на дне возникают локальные биопродуктивные экосистемы со сложными пищевыми цепями [14]. Так в местах выхода метана в задуговых бассейнах Лау и Манус юго-запада Тихого океана численность гастропод достигает сотен раковин, а биомасса — десятки килограммов на 1 м^2 дна [1].

Охотское море — один из богатейших по запасам метана водоемов. Впервые выходы метана были зафиксированы вблизи острова Парамушир [2]. Последующие экспедиции на НИС «Академик Лаврентьев» и «Zonpe» в Охотском море выявили более 500 выходов метана и 14 районов скопления газовых гидратов в интервале глубин от 150 до 1440 м [5].

Исследуемая акватория прилегает к восточной окраине Сахалина, по которой проходит тектоническая граница скольжения Амурской и Охотоморской плит [12]. Осадочная толща (>9 км) прилегающего шельфа и островного склона разбита сложной системой геологических разломов, что вероятно и обуславливает присутствие здесь многочисленных факелов, пузырьковых выделений метана (холодных сипов) и образование его кристаллогидратов в донных осадках.

В настоящее время в Охотском море проводятся комплексные исследования по выяснению условий формирования и разрушения газогидратов и их влиянию на водную среду и живые организмы. Одним из биоиндикаторов метана являются фораминиферы [15, 17]. Бентосные фораминиферы — обширная группа простейших морских организмов, тело которых защищено карбонатной и агглютинированной (песчаной) раковиной. Высокая чувствительность фораминифер к абиотическим факторам и хорошая сохранность в осадке позволяет по ним оценивать современнные и древние потоки метана. Благодаря деятельности метанотрофных бактерий и хемосинтезу, в холодных сипах синтезируется органическое вещество ($C_{\text{орг}}$), которое обеднено изотопом C^{13} [3, 16]. Этим же изотопом в метановых экосистемах обеднены и живые организмы, в том числе и бентосные фораминиферы. Анализ $\delta^{13}C$ в раковинах фораминифер из холодных сипов в океане показал, что содержание $\delta^{13}C$ у отдельных видов намного ниже фоновых величин [14, 15, 18].

В Охотском море до настоящего времени практически не проводилось ориентированных исследований фораминифер в местах выхода метана, за исключением краткого сообщения по впадине Дерюгина [9], и совсем нет данных по изотопии их раковин. В связи с этим, прибрежная акватория Восточного Сахалина с ее повышенным содержанием метана на дне и в донных отложениях представляет хороший полигон для таких исследований.

Цель данной работы — изучить фауну фораминифер в малоизученном секторе Охотского моря и установить в ней региональные виды-индикаторы повышенного содержания метана.

Материалы и методы

Материалом для данного исследования послужили 18 проб донного осадка, собранного с восточного островного склона Сахалина (рис. 1). Отбор проводился гидростатической трубкой диаметром 125 мм и длиной 550 см во время рейса LV50 на НИС «Академик Лаврентьев» в 2010 году. После подъема

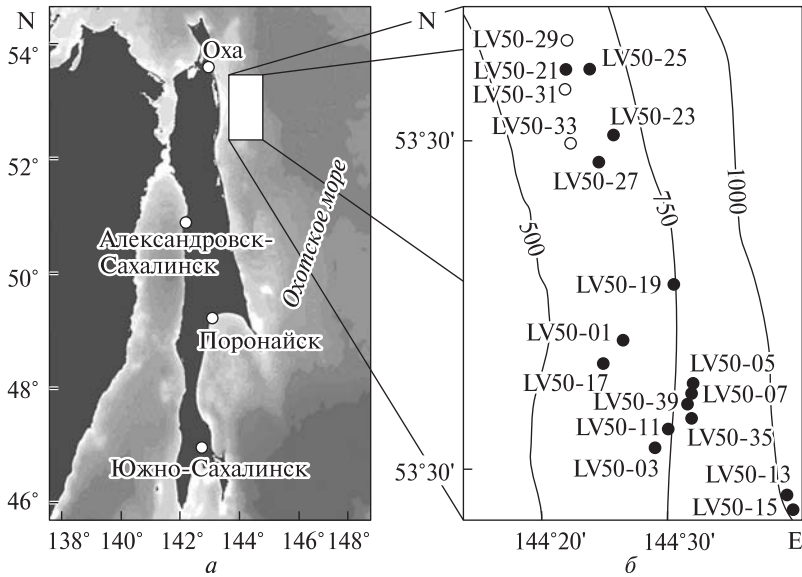


Рис. 1. Положение полигона (а); расположение станций на исследуемом полигоне (б)

кern делили пополам вдоль длины и пробу отбирали из 1/2 верхней части керна с площади 61 см² и мощностью 2 см. Станции отбора расположены в интервале глубин от 600 до 1000 метров. На всех станциях определяли содержание метана в воде и осадке.

Для просмотра микрофауны влажный осадок отмывали морской водой на сите с размером ячеек >0,05 мм. Затем отмытый материал фиксировали 70 % спиртовым раствором и заливали 10 % раствором бенгальской розы [6]. Этот краситель окрашивает плазму фораминифер в малиновый цвет, что дает возможность отделить пустые раковины от живых особей. Окрасивание раковин обычно длится 1—2 суток. При определении и подсчете особей фораминифер осадок просматривался под бинокулярным микроскопом МБС-9. В каждой пробе определяли таксономический состав и количественное содержание живых и пустых раковин фораминифер. В дальнейшем речь пойдет только о живых бентосных фораминиферах.

Определение изотопного состава кислорода и углерода в карбонате раковин фораминифер проводили на масс-спектрометре Finnigan-MAT253 в лаборатории морской геологии университета Тонжи (Шанхай, КНР). Стандартное отклонение составляло 0,07 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,05 ‰ для $\delta^{13}\text{C}$, а все полученные измерения привязаны к международной шкале (PDB), используя стандарт NBS19 [13]. Для изотопного анализа нами были выбраны виды с карбонатной раковиной (*Uvigerina peregrina parvocostata*, *Valvulineria sadonica* и *Nonionellina labradorica*), которые встречаются в большинстве изученных проб.

Для определения содержания метана в осадках на борту судна применялся метод равновесных концентраций с использованием хроматографа «Кристалл-Люкс 4000 М [4]. Погрешность измерений составляла 5 %.

Результаты

Фораминиферы. Фауна фораминифер исследуемого полигона обусловлена его географическим положением и своеобразием океанологических условий. Район находится на юго-западной периферии циклонического круговорота Охотского моря, одним из основных элементов которого является Восточносахалинское течение. Водные массы, переносимые течением, сформированы под влиянием стока реки Амур в Сахалинском заливе и Амурском лимане. Характерным отличием этих вод является пониженная солёность, которая летом на поверхности составляет 26—30 ‰. Преобладание летом ветра южных румбов смещает стержень течения от берега и активизирует процессы апвеллинга. Придонная вода на глубине 600—700 м на полигоне в летний период имеет следующие характеристики: температура -2°C , солёность — 34 ‰, содержание кислорода — 1,5 мл/л [8]. Концентрация метана на отдельных участках дна полигона превышает фоновые значения в 100 и более раз [5].

В исследуемом районе обнаружено 6 таксонов планктонных фораминифер (табл. 1), среди которых преобладают *N. pachyderma sin.* и *Globigerina bulloides*. Первый из них является представителем субарктической фауны, а второй — бореальный вид. К тому же, вид *G. bulloides* наиболее активно развивается в зонах апвеллинга и высокой первичной продукции [22]. Нами выделены право- и левозавитая разновидности *G. bulloides*. Отмечены немногочисленные экземпляры *Globigerina sp.*, занимающие по своим морфологическим признакам промежуточное положение между видами *N. pachyderma* и *Gl. inflata*. С первым видом они сходны по компактности самой раковины, отчетливой губе, субквадратной форме, а со вторым видом — по гладкой стенке, большим размерам и форме устья. Ранее в Японском море сходные морфотипы были выделены в самостоятельный вид *Globigerina nipponica* Asano, и, по-видимому, охотоморские экземпляры являются разновидностью данного вида [11].

Таблица 1

Станции	Распределение планктонных фораминифер на станциях																
	33	31	17	29	21	1	25	3	23	11	35	19	7	9	5	15	13
<i>Neogloboquadrina pachyderma sin.</i> (Ehrenberg)	4	6	8	0	5	14	24	26	72	26	124	320	489	72	640	162	72
<i>Globigerina quinqueloba</i> Natland	2	2	0	0	0	4	8	2	8	4	32	32	48	12	64	16	8
<i>Globigerina bulloides dex.</i> Orbigny	0	3	8	0	0	7	20	5	48	6	12	160	126	28	186	64	4
<i>Globigerina bulloides sin.</i> Orbigny	2	2	0	0	0	11	48	8	32	10	48	224	389	44	512	80	16
<i>Globigerinita glutinata</i> (Egger)	0	0	0	0	0	0	3	2	0	2	32	56	54	20	96	8	0
<i>Neogloboquadrina pachyderma dex.</i> (Ehrenberg)	0	0	0	0	0	2	1	1	4	0	0	23	45	0	64	16	4
Число раковин на 61см ²	8	13	16	0	5	38	104	44	164	48	348	815	1151	176	1562	346	104

Таблица 2. Распределение живых бентосных фораминифер на станциях

N станции	33	31	17	29	21	1	25	3	23	11	35	19	7	9	5	15	13
Глубина	611	614	615	630	641	665	677	690	700	720	765	775	782	782	785	1015	1020
<i>Globobulimina hanzawai</i> (Asano)	2	4	24		8	6	18	6	24	2	4	8	8		16		4
<i>Nonionella labradorica</i> (Dawson)	2	10	16		16	14	24	42	32	8	12	48	88	12		1	8
<i>Vavulineria sadonica</i> Asano	10	6	16		12	4	16	16	48	4	32	8	8	4		4	
<i>Uvigerina parvocostata</i> Saidova	6					20	12	10	8	2	12	8	8	4	32	5	
<i>Reophax dentaliniformis</i> (Brady)	2	2		1													
<i>Reophax curtus</i> (Cushman)	2									8			12				
<i>Pullenia aperta</i> Cushman		2										4					
<i>Trochammina voluta</i> Saidova		2								1			8				
<i>Criboelphidium batiale</i> (Saidova)			4				12	4	8								
<i>Cribroramoides batialis</i> Troitskaja et K. Fursenko					12												
<i>Rhabdammina abyssorum pacifica</i> Stschedrina					4												
<i>Discislandiella umbonata</i> (Voloshinova)						2							12				4
<i>Labropsira canariensis antarctica</i> Saidova						1		4									
<i>Mitiammina herzenstaini</i> (Schlubberger)						1		2									
<i>Nonionella japonica</i> Asano						1	6	2		2			16		3	16	
<i>Pullenia sphaeroides</i> (Orbigny)							6										
<i>Recurvooides turbinatus</i> (Brady)							6										
<i>Cibicides lobatulus</i> (Walker et Jacob)							6										
<i>Cribroramoides scitulus</i> (Brady)									16					4	16		
<i>Nonionella digidata</i> (Norvang)									8						8		
<i>Quinqueloculina patagonica</i> Orbigny									8								
<i>Brizalina spinescens</i> (Cushman)									8								
<i>Elphidium advenum depressulum</i> Cushman										2							
<i>Stainforthina loeblichii</i> (Feuling Hars))										4							
<i>Dentalina titata</i> Loeblich et McCulloch										2							
<i>Cibicides umbonatus</i> (Phleger et Parker)											4						
<i>Lagena elongata</i> (Ehrenberg)																	
<i>Robulus orbigni</i> (Bailey)														2			
<i>Oolina paradoxa</i> (Sedebottom)																	
<i>Reophax excentricus</i> Cushman																	
Общее число раковин на 61 см ²	24	26	44	1	52	53	84	86	152	35	64	116	152	24	72	15	32
Содержание CH ₄ мл/л в осадке	0,20	0,20	0,04	0,10	0,02	75,41	0,003	0,003	0,004	0,07	0,003	0,07	0,08	0,01	0,04	0,02	0,02

Всего в составе бентосных фораминифер встречено 75 видов, из них живых — 30 (табл. 2).

Распределение живых бентосных фораминифер на полигоне неравномерно. С увеличением глубины моря наблюдается изменение в обилии раковин и видовом составе комплекса бентосных фораминифер (табл. 1), что дает возможность выделить три основные группы: 1) виды, обитающие преимущественно на глубинах 600—800 м; 2) >800 м и 3) комплекс видов, встреченных в зонах повышенного содержания метана (>0,1 мл/дм³ в осадке).

Первая группа имеет наибольшее видовое разнообразие — от 7 до 13 видов и максимальную плотность поселения (станции 7, 19 и 23), которая доходит до 249180 экз./м². В комплексе доминируют виды: *Gl. hanzawai*, *N. labradorica*, *V. sadonica*, *U. parvocostata* и менее представлен *Criboelphidium batiale*. В аксессуарной группе наиболее представительны виды с карбонатной раковиной — *D. umbonata*, *C. lobatulus*, *N. digitata*, *B. spinescens*, *L. elongata* и агглютинированной раковиной — *R. dentaliniformis*, *Rh. abyssorum pacifica*, *Tr. voluta*, *Cribrostomoides batialis*, *C. scitulus*.

Во **второй группе** (станции 13, 15) снижается численность раковин до 5245 экз./м² и сокращается количество видов до 4. Комплекс фораминифер представлен видами *Globobulimina hanzawai*, *Nonionella japonica*, *Uvigerina parvocostata*, *Valvulineria sadonica*, *Discoislandiella umbonata*. Все эти виды встречены в составе первой группы, но в большем количестве раковин.

К **третьей группе** отнесены сообщества фораминифер, обитающие в районе факелов на станциях 29, 31 и 33. Именно в районе этих станций в придонном слое воды отмечены потоки пузырьков метана с содержанием до 2000–4000 мл/л, превышая фоновые значения в 100 и более раз. Ранее, на этих же станциях, в донных колонках обнаружены слои кристаллогидратов мощностью до 1 м (Обжиров, 2011). В составе бентоса отмечено резкое снижение видового разнообразия и обилия раковин. На станции 29 встречен только один вид *R. dentaliniformis* (163 экз./м²). На станции 31 отмечено 6 видов (4262 экз./м²) и резко доминируют *N. labradorica* и *V. sadonica*. На станции 33 встречено также 6 видов (3934 экз./м²), но здесь доминируют *V. sadonica* и *U. parvocostata*.

В составе планктонных фораминифер на станциях 31 и 33 число таксонов снижается до 3 (*N. pachyderma sin.*, *G. bulloides sin.*, *G. bulloides dex.*), а раковин до 1250 экз./м². Полное отсутствие их отмечено на станции 29.

Таблица 3

Содержание изотопов O ¹⁸ и C ¹³ в раковинах бентосных фораминифер											
Станции	33	31	17	1	25	3	23	11	19	9	5
<i>N. labradorica</i> δ C ¹³	-1,49	-1,17	-1,22	-1,44	-1,9	-1,36	-1,76	-1,77	-1,88	-1,79	-2,01
<i>N. labradorica</i> δ O ¹⁸	3,34	3,38	3,45	3,35	3,37	3,34	3,25	3,33	3,39	3,28	3,35
<i>V. sadonica</i> δ C ¹³	-0,98	-1,45	-0,79	-0,73	-0,72	-0,85	-0,76	-0,72	-1,01	-0,99	-1,06
<i>V. sadonica</i> δ O ¹⁸	2,81	2,95	3,02	2,84	3,04	2,88	3,04	2,81	2,95	2,89	2,85
<i>U. parvocostata</i> δ C ¹³	-0,93	-1,03	-0,90	-1,03	-1,10	-0,97	-1,08	-1,11	-1,01	-1,24	-0,97
<i>U. parvocostata</i> δ O ¹⁸	3,49	3,54	3,50	3,44	3,43	3,60	3,43	3,45	3,48	3,56	3,47
Число раковин	58	102	112	213	570	330	744	136	588	106	864
CH ₄ , мл/л	0,20	0,20	0,04	0,41	0,003	0,003	0,004	0,07	0,07	0,01	0,04

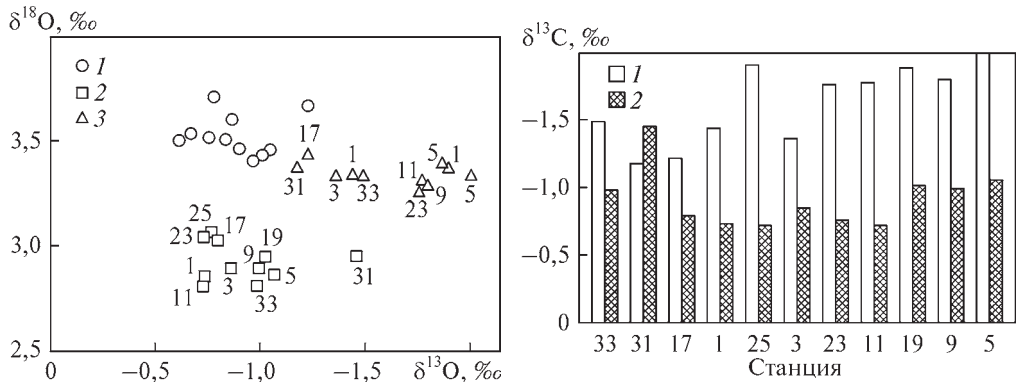


Рис. 2. Содержание изотопов углерода и кислорода (‰) в раковинах фораминифер по станциям: 1 — *Uvigerina peregrina parvocostata*; 2 — *Valvulineria sadonica*, 3 — *Nonionellina labradorica*

Рис. 3. Вариации значений $\delta^{13}\text{C}$ (‰) в раковинах видов *Nonionellina labradorica* (1), и *Valvulineria sadonica* (2) на станциях

На станциях 3, 7, 19, 23, 25 и 35 с невысоким содержанием метана на дне (<0,1 мл/л) количество бентосных видов возрастает от 5 до 13, а численность раковин — от 10000 до 24516 экз./м². Те же закономерности отмечены и в составе планктонных фораминифер (табл. 1). Повышенное содержание численности раковин фораминифер, вероятно, обусловлено усилением биопродуктивности верхнего слоя воды, на что указывает высокое участие вида *G. bulloides* в составе планктона.

Содержание изотопов кислорода и углерода в раковинах фораминифер. Соотношение изотопов кислорода и углерода изучено в карбонатных раковинах трех видов бентосных фораминифер. Основные результаты приведены в табл. 3 и на рис. 2, 3.

Анализ таблицы 3 показал, что вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ как в пределах одного, так и между разными видами, невелики. Так, амплитуды величин $\delta^{18}\text{O}$ меняются у вида *U. parvocostata* в интервале 3,43–3,60 ‰, *V. sadonica* — 2,81–3,04 ‰ и *N. labradorica* — 3,28–3,37 ‰. Это позволяет полагать, что изотопно-кислородные данные имеют второстепенное значение при поиске видов-индикаторов метана. Различия $\delta^{18}\text{O}$ между разными видами, по-видимому, обусловлены их жизненным циклом.

Более сложная динамика отмечена в изменениях величин $\delta^{13}\text{C}$, хотя их всех объединяет поле отрицательных значений (табл. 3). Они меняются у вида *U. parvocostata* от –0,90 до –1,24 ‰; *V. sadonica* от –0,72 до –1,45 ‰ и *N. labradorica* от –1,17 до –2,00 ‰. Амплитуды изменений $\delta^{13}\text{C}$ в двух последних видах превышают их стандартное отклонение и могут быть обусловлены какими-то локальными факторами природной среды. Ранее было показано, что в одних и тех же видах фораминифер значения $\delta^{13}\text{C}$ на разных глубинах мало меняются и больше зависят от биопродуктивности поверхностных вод, поставки неорганического углерода и микробиологических процессов в донных осадках [16].

По данным изотопного анализа нами построена матрица, отражающая изменение значений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ по трем видам на изученных станциях (рис. 2). Каждый из видов имеет свое поле значений, которые почти не пересекаются

друг с другом. Наиболее компактно расположились станции с данными по *U. parvocostata*. Изотопные данные по видам *V. sadonica* и *N. labradorica* имеют линейный тренд вдоль оси абсцисс, со смещением в сторону отрицательных значений. Особенно это заметно у вида *N. labradorica*.

Минимальное значение $\delta^{13}\text{C}$ у вида *V. sadonica* ($-1,49\text{‰}$) отмечено на станции 31, где зафиксирован активный выход метана (рис. 3). Отдельной группой расположились станции (5, 9, 33), в которых наблюдается диффузное просачивание метана через осадки. Величины $\delta^{13}\text{C}$ *V. sadonica* в местах отбора больше на $0,5\text{‰}$, чем на станции 31. По-видимому, снижение значений $\delta^{13}\text{C}$ в составе раковин данного вида на вышеуказанных станциях связано с усилением притока метана.

Линейно по оси абсцисс расположились значения $\delta^{13}\text{C}$ на станциях для вида *N. labradorica* (см. рис. 2). Однако, по сравнению с *V. sadonica*, облегчение изотопом C^{13} у данного вида происходит не в зонах активных метановых сипов, а на станциях (5, 19, 23) с высокой биопродуктивностью. (см. табл. 1 и 2). По-видимому, этот фактор на полигоне и контролирует поле значений $\delta^{13}\text{C}$ вида *N. labradorica*. Ранее было установлено, что снижение содержания изотопа C^{13} в раковинах данного вида связано с увеличением первичной продукции [20].

Таким образом, данные изотопного анализа указывают, что наиболее вероятным биоиндикатором метановых потоков является вид *Valvulineria sadonica*.

Обсуждение результатов

В современном Охотском море Х.М. Саидовой [7] выделено 16 глубоководных сообществ бентосных фораминифер, одно из которых с *Uvigerina peregrina parvocostata* наиболее соответствует фауне исследуемого нами района. В Охотском море оно встречено на курильском, сахалинском и камчатском склонах в интервале глубин 240—1550 м.

В составе фауны исследуемого полигона, помимо *Uvigerina peregrina parvocostata*, также доминируют виды *V. sadonica*, *N. labradorica*, *Gl. hanzawai* и *R. dentaliniformis*. Первые три вида относятся к инфауне и являются показателем высокоорганического потока [21].

Высокая экологическая толерантность отдельных представителей родов *Uvigerina*, *Nonionella*, *Globulimina* и *Valvulineria* позволяет им населять не только различные биотопы, но и хорошо адаптироваться отдельным видам в местах разгрузки метана [14, 15, 18]. Ряд исследователей полагает возможным выделять показательные виды метановых экосистем [19]. Обилие раковин планктонного вида *G. bulloides* в поверхностных осадках на полигоне указывает на активизацию процессов апвеллинга и роста первичной продукции. Высокий процент участия холодноводной *N. pachyderma sin* в составе планктона указывает на его субарктический облик.

Все вышеперечисленные признаки фауны бентосных и планктонных фораминифер не случайны, а закономерно отражают особенности современной природной среды на шельфе и склоне Восточного Сахалина.

В результате проведенного фораминиферового анализа установлено, что региональными видами-индикаторами метана в исследуемом районе могут быть *V. sadonica*, *N. labradorica* и *U. parvocostata*. В окончательном выборе наиболее

значимыми оказались результаты изотопного анализа кислорода и углерода в раковинах этих трех видов бентосных фораминифер.

Изменение соотношений изотопов кислорода в раковинах бентосных фораминифер, прежде всего, зависит от изменения объема планетарного льда (меняется температура и соленость воды), глубины и витального эффекта, определяющего изотопное фракционирование разных видов [14, 13, 18]. На исследуемом полигоне вариации $\delta^{18}\text{O}$ как на уровне одного, так и между разными видами оказались незначительными. Это, по-видимому, было обусловлено малой вариабельностью солености и температур на дне в связи с близким положением изученных станций. Вместе с тем, изменение этих же океанологических параметров может существенно влиять на соотношение изотопов кислорода в раковинах живых фораминифер. Так, например, снижение солености на 2 ‰ в одном из фиордов Шпицбергена вызывает изменение значений $\delta^{18}\text{O}$ в раковинах *N. labradorica* на 0,5–1 ‰ [20], а понижение придонной температуры с глубиной от 1000 до 3000 м в Южнокитайском море уменьшает величину $\delta^{18}\text{O}$ у вида *Cibicidoides wuellerstorfi* на 0,55 ‰ [13].

Соотношение изотопов углерода в раковинах бентосных фораминифер главным образом зависит от интенсивности потока органического вещества, растворенного неорганического карбона с суши и микробиологических процессов в донных осадках [16]. Доказано, что на снижение значений $\delta^{13}\text{C}$ в раковинах бентоса влияет увеличение биопродуктивности поверхностных вод и содержания метана [15]. С этим хорошо согласуются и наши данные. В исследуемом полигоне два вида *V. sadonica* и *N. labradorica* имеют наиболее низкие значения $\delta^{13}\text{C}$ по сравнению с их фоновыми величинами. Первый из них, по-видимому, является трассером метана, а второй — индикатором высокой первичной продукции. Наиболее низкие значения $\delta^{13}\text{C}$ вида *V. sadonica* отмечены в зонах активного и диффузного выходов метана и достигают своего минимума (–1,49 ‰) на станции LV50-31.

В наших пробах обилие вида *N. labradorica* обычно совпадает с высокой численностью *Globigerina bulloides* — индикатором биопродуктивности. На зависимость между органическим потоком и фракционированием изотопов углерода в живых раковинах *N. labradorica* указывают данные по акватории Шпицбергена. Отмечено, что за счет роста первичной продукции снижаются значения $\delta^{13}\text{C}$ *N. labradorica* от –1,7 до –3,2 ‰ [20]. Этому факту не противоречит и наш вывод о том, что снижение значений $\delta^{13}\text{C}$ *N. labradorica* связано не с метаном, а с увеличением потока органического вещества.

Снижение числа видов и обилия раковин планктонных фораминифер отмечено в зоне метановых сипов (>0,1 мл/л) на станциях 31, 33 и полное отсутствие их на станции 29. Это можно объяснить либо негативным влиянием метана на развитие планктона в водной толще, либо растворением их раковин на дне. В пользу первого свидетельствуют интенсивное выделение метана из донных источников и подъем его на 600–1000 м вверх в виде многочисленных облаков газовых пузырьков, фиксируемых акустическим профилированием. Это же подтверждается и значительным превышением фоновых значений газа в водной толще [5]. Почти по всей акватории исследуемого полигона поверхностный слой воды пересыщен метаном по сравнению с атмосферой на 200–300 % с максимумом 1468 % в 2008 году [4]. На возможность растворения карбонатных раковин

указывают результаты просмотра фораминифер в донных колонках, отобранных на этом же полигоне. В местах активного выхода метана происходит полное или частичное растворение карбонатных раковин в толще осадков, в то время как на поверхности встречены живые и пустые раковины фораминифер. Необходимо отметить, что данный вопрос требует дополнительного изучения.

По-видимому, во время наиболее интенсивных газовыделений происходит заражение метаном участков дна, что приводит к гибели бентосных организмов или их миграции из очаговых мест. Это видно по снижению численности раковин бентосных фораминифер и присутствию в фауне только трех видов: *Nonionellina labradorica*, *Valvulineria sadonica*, *Uvigerina parvocostata* (см. табл. 2). Большая толерантность данных таксонов к разным экологическим обстановкам [19] и привела к их выживанию в зонах с повышенным содержанием метана. Но такие условия часто ведут к аноксии, происходит растворение карбонатных раковин, и тогда должны сохраняться только агглютинированные формы. Этот процесс нами отмечен на станции 29, где встречен только один агглютинирующий вид — *Reophax dentaliniformis*.

На станциях с диффузным просачиванием метана через осадки (<0,1 мл/л) более активно развиваются метанотрофные бактерии, вырабатывая дополнительное органическое вещество. По-видимому, увеличение кормовой базы фораминифер и привело к возрастанию численности раковин в осадке и большему их видовому разнообразию в таких местах.

Необходимо отметить, что на миграцию и биопродуктивность современных бентосных сообществ в метановых экосистемах часто влияет интенсивность и длительность существования метановых факелов. Но пока этот вопрос мало изучен. На станции 1 во время работ отмечено самое высокое содержание метана (75 мл/л), но это не отразилось на численности раковин, видовом и изотопном составе фораминифер. Возможно, что в этом районе метановый очаг возник совсем недавно.

Выводы

1. Потоки метана на островном склоне Восточного Сахалина оказывают воздействие на донные биоценозы. Анализ видового и изотопного состава бентосных фораминифер, численности их раковин в осадках исследуемого района показал, что они избегают активных зон выхода метана и предпочитают расселяться в местах его диффузного просачивания через осадочную толщу. По данным фораминифероанализа, наиболее адаптированными к условиям повышенного содержания метана оказались виды *Uvigerina parvocostata*, *Valvulineria sadonica*, *Nonionellina labradorica* и *Reophax dentaliniformis*.

2. Сравнительный анализ соотношения стабильных изотопов кислорода и углерода в карбонатных раковинах трех бентосных видов показал, что вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ как на уровне одного, так и между разными видами, незначительны. Амплитуды значений $\delta^{18}\text{O}$ по видам *Uvigerina parvocostata*, *Valvulineria sadonica* и *Nonionellina labradorica* равны: 3,43—3,60; 2,81—3,04 и 3,28—3,37 ‰ соответственно. Поэтому при поиске видов-индикаторов результаты анализа соотношения изотопов кислорода, вероятно, имеют второстепенное значение. Большие вариации отмечены по $\delta^{13}\text{C}$, которые меняются от $-0,90$ до $-2,0$ ‰. Причем от-

клонение значений $\delta^{13}\text{C}$ вида *V. sadonica* в зоне активного выхода метана превышает его фоновые вариации и достигает своего минимума ($-1,54\text{‰}$) на станции LV50-31. Значительное облегчение изотопом C^{13} фиксируется и в раковинах *N. labradorica*. Однако, это обусловлено увеличением биопродуктивности, а не метана.

3. Результаты анализа фораминифер и изотопии их раковин показали, что в исследуемом районе биоиндикатором повышенного содержания метана у дна является вид *Valvulineria sadonica*.

Авторы выражают благодарность начальнику экспедиции проф. А.И. Обжирову за возможность участия в рейсе LV-50 и получения материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. — М.: ГЕОС, 2001. — 500 с.
2. Зонненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В. и др. Подводный газовый источник в Охотском море к западу от острова Парамушир // Океанология. — 1987. — № 5. — С. 795—800.
3. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. — М.: Наука, 2009. — 576 с.
4. Мишукова Г.И., Верещатна О.Ф. Распределение метана и его потоков на границе вода-атмосфера на акватории шельфа, склона острова Сахалин и впадины Дерюгина (Охотское море) // Вестник ДВО РАН. — 2011. — № 6. — С. 64—71.
5. Обжиров А.И. Международная научная экспедиция в Охотском море (рейс 56, август 2011) // Вестник ДВО РАН. — 2011. — № 6. — С. 124—128.
6. Саидова Х.М. Бентосные фораминиферы Мирового океана. — М.: Наука, 1976. — 159 с.
7. Саидова Х.М. Глубоководные сообщества фораминифер Берингова и Охотского морей // Океанология. — 1997. — Т. 37. — № 1. — С. 105—112.
8. Соснин В.А., Тищенко П.Я., Салюк А.Н., Бибов Н. «Теплый» холодный подповерхностный слой Охотского моря // Метеорология и гидрология. — 2008. — № 2. — С. 70 — 77.
9. Хусид Т.А., Доманов М.М., Свинников А.И. Особенности видового состава и распределения фораминифер во впадине Дерюгина (Охотское море) // Известия РАН. Серия биологическая. — 2006. — № 2. — С. 217—224.
10. Шнюков Е.В., Гожик П.Ф., Краюшкин В.А., Клочко В.П. В трех шагах от субмариной добычи газогидратов // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. — 2007. — № 1. — С. 32—51.
11. Asano K. The foraminifera from the adjacent seas of Japan collected by the S.S. Soyo-marry, 1922—1930 // Sci. Rep. Tohoku Univ. — 1957. — Ser. 2. — 27 p.
12. Baranov B.V., Jin Y.K., Shoji H. et al. Gas Hydrate System of the Sakhalin Slope: Geophysical approach // Scientific Report of the Sakhalin Slope Gas Hydrate Project. — 2007. — 116 p.
13. Cheng X., Huang B., Jian Z. et al. Foraminiferal isotopic evidence for monsoonal activity in the South China Sea: a present-LGM comparison // Marine Micropaleontology. — 2005. — N. 34. — P. 125 — 139.
14. Dickens G.R., O Neil J.R., Rea D.K. et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene // Paleocyanography. — 1995. — Vol. — 10. — P. 965 — 971.
15. Kennett J.P., Cannariato K.G., Hendy I.L. and Behl R.J. Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary interstadials // Science. — 2000. — Vol. 288. — P. 128—133.
16. McCorkle, D.C., B.H. Corliss, Farnham C.A. Vertical distributions and stable isotopic compositions of live (stained) benthic foraminifera from the North Carolina and California continental margins // Deep Sea Research. — 1997. — N 44 (6). — P. 983—1024.
17. Rathburn A.E., Levin L.A., Hela Z. et al. Benthic Foraminifera associated with cold methane seeps on the Northeastern California margin: Ecology and stable isotopic composition // Mar. Micropaleontol. — 2000. — Vol. 38. — P. 247—266.
18. Ruskin G. Methane-driven oceanic eruptions and mass extinctions // Geology. — 2003. — Vol. 31. — N 9. — P. 741—744.

19. Sen Gupta B.K., and P. Aharon P. Benthic foraminifera of bathyal hydrocarbon vents of the Gulf of Mexico: Initial Report on communities and stable isotopes // *Geo-marine Letters*. — 1994. — N14. — P. 88—96.
20. Shetye S., Mohan R., Shukla S.K. et al. Variability of *Nonionellina labradorica* Dawson in surface Sediment from Kongsfjorden, West Spitsbergen // *Acta Geologica sinica*. — 2011. — Vol. 85. — N 3. — P. 549—558.
21. Smart C.W., King S.C., Gooday A.J. et al. A benthic foraminiferal proxy of pulsed organic matter paleofluxes // *Mar. Micropaleontol.* — 1994. — Vol. 23. — P. 89—104.
22. Zanic S., Donner B., Fischer G. et al. Sensitivity of planktonic foraminifera to sea surface temperature and export production as derived from sediment trap data // *Mar. Micropaleontol.* — 2005. — Vol. 55. — P. 75—105.

Статья поступила 18.06.2014

С.П. Плетнев, Ю. Ву, В.К. Аннин

БІОІНДИКАЦІЯ МЕТАНОВИХ ЕКОСИСТЕМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ФОРАМІНІФЕР ТА ІЗОТОПІЇ ЇХ ЧЕРЕПАШОК (ОХОТСЬКЕ МОРЕ)

Розглянуто можливості використання форамініфер як біоіндикаторів метанових екосистем. Проведено аналіз видового складу і кількісного розподілу черепашок планктонних і бентосних форамініфер з поверхневого шару осадів, відібраних на 18 станціях острівного схилу Східного Сахаліну на глибині 600—1500 м. Показано, що в місцях активного виходу метану знижується чисельність черепашок планктонних і бентосних форамініфер, а також знижується їх видове різноманіття. У складі бентосних форамініфер метанових екосистем домінують черепашки карбонатних видів *Uvigerina peregrina parvocostata*, *Valvulineria sadonica*, *Nonionellina labradorica* і аглютиновані *Reophax dentaliniformis*. У перших трьох видах вивчено співвідношення ізотопів кисню і вуглецю в карбонаті їх черепашок. Результати ізотопного аналізу вуглецю вказують, що найбільш вірогідним індикатором метану може бути вид *Valvulineria sadonica*.

Ключові слова: Бентосні і планктонні форамініфери, ізотопи кисню і вуглецю, метан, Охотське море.

S.P. Pletnev, Yu. Vu, V.K. Annin

BIOINDICATION METHANE ECOSYSTEM-BASED ANALYSIS IZOTOPIYI FORAMINIFERA AND THEIR SHELLS (OKHOTSK SEA)

Analysis of the composition and quantitative distribution of planktonic and benthic foraminifera in upper bathyal sediments collected at 18 stations in Eastern Sakhalin archipelagic slope at depths from 600 to 1500 m demonstrated specific foraminiferal assemblages associated with cold methane seeps. It is shown that number of shells of planktonic and benthic foraminifera, their species diversity decreases in areas of the active methane seeps. Among the benthic fauna of the methane ecosystem carbonate *Uvigerina peregrina parvocostata*, *Valvulineria sadonica*, *Nonionellina labradorica* and agglutinating *Reopha dentaliniformis* dominates. Isotopic data indicate that *Valvulineria sadonica* may be tracer of methane.

Key words: benthos and planktonic foraminifers, isotopes of oxygen and carbon, methane, Sea of Okhotsk.