

УДК 563.12(265.53)

С.П. Плетнев<sup>1</sup>, В.К. Аннин<sup>1</sup>, Ю. Ву<sup>2</sup>, Т.С. Тарасова<sup>3\*</sup><sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;<sup>2</sup> Первый океанографический институт, 266061, Циндао, Китай;<sup>3</sup> Институт биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17

### ФОРАМИНИФЕРЫ И ИЗОТОПИЯ ( $O^{16}/O^{18}$ И $C^{12}/C^{13}$ ) ИХ РАКОВИН В МЕСТАХ ВЫХОДА МЕТАНА НА ВОСТОЧНОМ СКЛОНЕ О. САХАЛИН (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 *V. sadonica*.

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

Pletnev S.P., Annin V.K., Wu Yu., Tarasova T.S. Foraminifers and stable isotopes ( $O^{16}/O^{18}$  and  $C^{12}/C^{13}$ ) of their shells at methane seepages on eastern slope of Sakhalin Island (Okhotsk Sea) // Izv. TINRO. — 2014. — Vol. 178. — P. 180–190.

Benthic foraminifers at methane seepages, independently of their taxa and microhabitat preferences, have lower value of  $\delta^{13}C$  than those found in other sites, that's why these species potentially could be used as bioindicators of methane emission. Species composition and distribution of Foraminifera is analyzed on the samples collected in the cruise of RV Academic M.A. Lavrentyev on 18 stations located on the eastern slope of Sakhalin Island within the depth range 600–1500 m in June 2010. Concentrations of methane in the bottom water and sediments of the surveyed area were high and sometimes exceeded the maximal permissible level in 100 times and more; methane contaminated the whole water column (600 m) and lowered abundance of zooplankton. Both benthic (75 species) and planktonic foraminifers (6 taxa) are

\* Плетнев Сергей Павлович, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: pletnev@poi.dvo.ru; Аннин Владимир Кузьмич, ведущий инженер, e-mail: annin@poi.dvo.ru; Юньхуа Ву, ведущий научный сотрудник, e-mail: yhwu@fio.org.cn; Тарасова Татьяна Сергеевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, e-mail: tanya.taras2012@mail.ru.

Pletnev Sergey P., D.Sc., leading researcher, e-mail: pletnev@poi.dvo.ru; Annin Vladimir K., leading engineer, e-mail: annin@poi.dvo.ru; Wu Yu., leading researcher, e-mail: yhwu@fio.org.cn; Tarasova Tatiana S., Ph.D., researcher, e-mail: tanya.taras2012@mail.ru.

investigated. The benthic foraminifers avoided the methane ejections but preferred to settle in places of its diffusive infiltration where their abundance was high, presumably because of blooming of chemoautotrophic bacteria in bottom sediments saturated by methane. The genera *Nonionellina*, *Valvulineria*, *Uvigerina* and the species *Reophax dentaliniformis* were the most adapted for the polluted environment. Stable isotopes  $O^{16}/O^{18}$  and  $C^{12}/C^{13}$  are measured in carbonate shells of *Uvigerina parvocostata*, *Valvulineria sadonica*, *Nonionellina labradorica*. Intraspecific changes of  $\delta^{18}O$  were insignificant, it varied in the ranges 3.43–3.60, 2.81–3.04, and 3.28–3.37 ‰, respectively. Variability of  $\delta^{13}C$  was higher — 0.9–2.0 ‰ for *U. parvocostata* and *N. labradorica* and its value dropped to –1.54 ‰ for the specimens of *V. sadonica* in the sites of methane seepage. Thus, *V. sadonica* is the best species-indicator of methane emission.

**Key words:** foraminifera,  $O^{16}/O^{18}$  isotope,  $C^{12}/C^{13}$  isotope, methane, Okhotsk Sea, gas-hydrate.

## Введение

Охотское море — один из богатейших по запасам метана водоемов. Впервые выходы метана были зафиксированы вблизи о. Парамушир (Зонненшайн и др., 1987). Последующие экспедиции на НИС «Академик Лаврентьев» и «Zonne» в Охотском море выявили более 500 выходов метана и 14 районов скоплений газовых гидратов в интервале глубин от 150 до 1440 м (Обжиров, 2011).

Исследуемая акватория прилегает к восточной окраине Сахалина, по которой проходит тектоническая граница скольжения Амурской и Охотоморской плит (Baranov et al., 2008). 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 влияния на водную среду и живые организмы. Один из биоиндикаторов метана — фораминиферы (Kennett et al., 2000; Rathburn et al., 2000). 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 позволяют оценивать по ним современные и древние потоки метана. Благодаря деятельности метанотрофных бактерий и хемосинтезу в холодных сипах синтезируется органическое вещество, которое обеднено изотопом  $C^{13}$  (Леин, Иванов, 2009). 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 значения  $\delta^{13}C$  у отдельных видов намного ниже их фоновых величин (Dickens et al., 1995; Kennett et al., 2000; Ruskin, 2003).

В Охотском море до настоящего времени практически не проводилось ориентированных исследований фораминифер в местах выхода метана, за исключением краткого сообщения по впадине Дерюгина (Хусид и др., 2006), 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 собой хороший полигон для таких исследований.

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

## Материалы и методы

Материалом для данного исследования послужили пробы поверхностного грунта (рис. 1), собранные на 18 станциях на восточном склоне о. Сахалин. Отбор проводился гидростатической трубкой диаметром 125 мм и длиной 550 см во время рейса LV-50 на НИС «Академик Лаврентьев» в 2010 г. После подъема керн делили пополам вдоль и осадок мощностью 2 см отбирали из  $\frac{1}{2}$  верхней части керна с площади 61 см<sup>2</sup>.

Станции отбора расположены в интервале глубин от 600 до 1500 м. На всех станциях определяли содержание метана в воде и осадке.

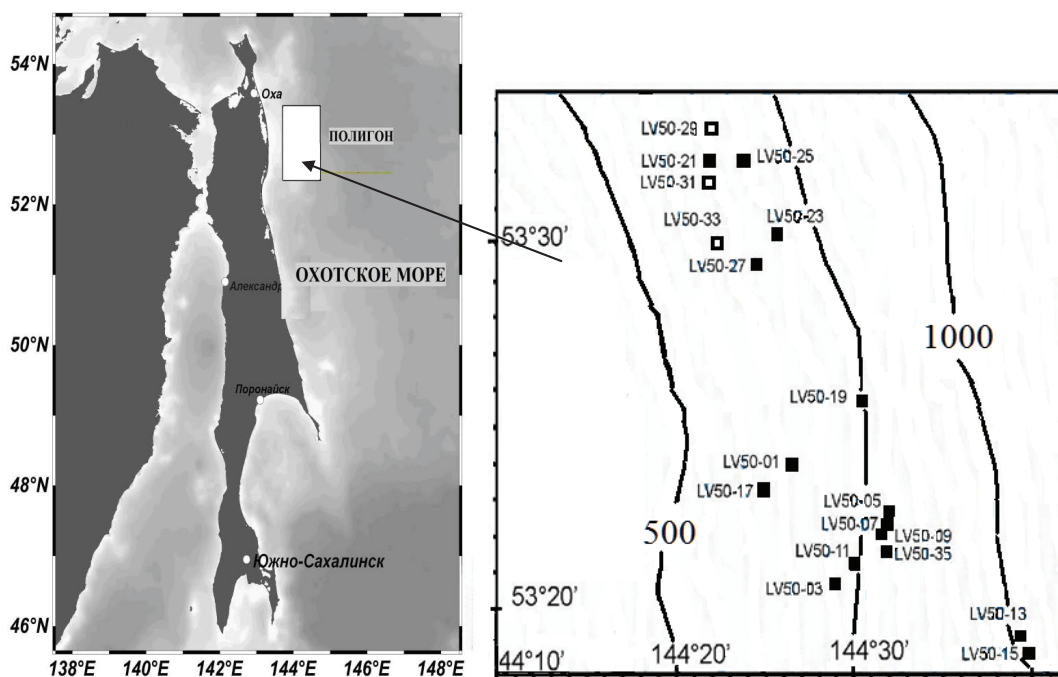


Рис. 1. Положение станций на исследуемом полигоне

Fig. 1. Sampling stations arrangement

Для просмотра микрофауны влажный осадок отмывали морской водой на сите с размером ячеек  $> 0,05$  мм. Затем отмытый материал фиксировали 70 %-ным спиртовым раствором и заливали 10 %-ным раствором бенгальской розы (Саидова, 1976). Этот краситель окрашивает плазму фораминифер в малиновый цвет, что дает возможность отделить пустые раковины от живых особей. Окрашивание раковин обычно длится 1–2 сут. 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) с использованием стандарта NBS19 (Cheng et al., 2005). 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 4000М» (Мишукова, Верещагина, 2011). Погрешность измерений составляла 5 %.

## Результаты и их обсуждение

### 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 Восточно-Сахалинское течение. Водные массы, перенос-

симые течением, сформированы под влиянием стока р. 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 °С, солёность — 34 ‰, содержание кислорода — 1,5 мл/л (Соснин и др., 2008). Концентрация метана на отдельных участках дна полигона превышает фоновые значения в 100 раз и более (Обжиров, 2011).

В исследуемом районе обнаружено 6 таксонов планктонных фораминифер (табл. 1), среди которых преобладают *Neogloboquadrina 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 (Zaric et al., 2005). 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 *Globorotalia inflata*. С первым видом они сходны по компактности самой раковины, отчетливой губе, субквадратной форме, а со вторым — 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 (Asano, 1957).

Таблица 1

Распределение планктонных фораминифер на станциях

Table 1

Вид	Станция																
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	29	31	33	35
<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> sin. (Ehrenberg)	14	26	640	489	72	26	72	162	8	320	5	72	24	0	6	4	124
<i>Globigerina quinqueloba</i> Natland	4	2	64	48	12	4	8	16	0	32	0	8	8	0	2	2	32
<i>Globigerina bulloides</i> dex. Orbigny	7	5	186	126	28	6	4	64	8	160	0	48	20	0	3	0	112
<i>Globigerina bulloides</i> sin. Orbigny	11	8	512	389	44	10	16	80	0	224	0	32	48	0	2	2	48
<i>Globigerinita glutinata</i> (Egger)	0	2	96	54	20	2	0	8	0	56	0	0	3	0	0	0	32
<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> dex. (Ehrenberg)	2	1	64	45	0	0	4	16	0	23	0	4	1	0	0	0	0
Число раковин на 61 см <sup>2</sup>	38	44	1562	1151	176	48	104	346	16	815	5	164	104	0	13	8	348

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 (см. 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/л в осадке).

**Первая группа** имеет наибольшее видовое разнообразие, от 7 до 13 видов, и максимальную плотность поселения (ст. 7, 19 и 23), которая доходит до 249180 экз./м<sup>2</sup>. В комплексе доминируют виды *Globobulimina hanzawai*, *N. labradorica*, *V. sadonica*, *U. parvocostata*, менее представлен *Criboelphidium batiale*. В акцессорной группе

Таблица 2  
Table 2  
Распределение живых бентосных фораминифер на станциях  
Distribution of living benthic foraminifers by stations

Вид	Станция																35																
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	29	31	33																	
																		Глубина, м															
																		665	690	785	782	782	720	1020	1015	615	775	641	700	677	630	614	611
<i>Globobulimina hanzawai</i> (Asano)	6	6	16	8		2	4		24	8	8	24	18		4	2	4																
<i>Nonionellina labradorica</i> (Dawson)	14	42		88	12	8		1		48	16	32	24		10	2	12																
<i>Valvulineria sadonica</i> Asano	4	16				4	8	4	16	8	12	48			6	10	32																
<i>Uvigerina parvocostata</i> Saidova	20	10	32	8	4	2		5		8		8	12	1	2	2	12																
<i>Reophax dentaliniformis</i> (Brady)																																	
<i>Reophax curtus</i> (Cushman)																2																	
<i>Pullenia aperta</i> Cushman				12		8									2																		
<i>Trochammina voluta</i> Saidova										4					2																		
<i>Criboelphidium batiale</i> (Saidova)		4		8		1				8			12																				
<i>Cribrostamoides batialis</i> Troitskaia et K. Fursenko											12	8																					
<i>Rhabdammina abyssorum pacifica</i> Stschedrina											4																						
<i>Discoislandiella umbonata</i> (Voloshinova)	2			12																													
<i>Labrospira canariensis antarctica</i> Saidova	1	4					4			8																							
<i>Miliammina herzenstainii</i> (Schlumberger)	1	2																															
<i>Nonionella japonica</i> Asano	1	2		16	2	2		3					6																				
<i>Pullenia sphaeroides</i> (Orbigny)							16						6																				
<i>Recurvoides turbinatus</i> (Brady)													6																				
<i>Cibicides lobatulus</i> (Walker et Jacob)										4																							
<i>Cribrostamoides scitulus</i> (Brady)			16		4							16																					
<i>Nonionella digitata</i> (Norvang)			8							4		8																					
<i>Quinqueloculina patagonica</i> Orbigny												8																					
<i>Brizalina spinescens</i> (Cushman)						2				4																							
<i>Elphidium advenum depressulum</i> Cushman						4																											
<i>Stainforthina loeblichii</i> (Feuling Hars)						2																											
<i>Dentalina itata</i> Loeblich et McCulloch																	4																
<i>Cibicides umbonatus</i> (Phleger et Parker)										4																							
<i>Lagena elongata</i> (Ehrenberg)										4																							
<i>Robulus orbigni</i> (Bailey)					2																												
<i>Oolina paradoxa</i> (Sedebottom)																																	
<i>Reophax excentricus</i> Cushman								2																									
Общее число раковин на 61 см <sup>2</sup>	49	86	72	152	24	35	32	15	44	116	52	152	84	1	26	24	64																
Содержание CH <sub>4</sub> , мл/л в осадке	75,41	0,003	0,04	0,08	0,01	0,07	0,02	0,02	0,04	0,07	0,02	0,004	0,003	0,10	0,20	0,20	0,003																



наиболее представительны виды с карбонатной раковиной — *Discoislandiella umbonata*, *Cibicidoides lobatulus*, *Nonionella digidata*, *Brizalina spinescens*, *Lagena elongata* — и агглютинированной раковиной — *Reophax dentaliniformis*, *Rhabdammina abyssorum pacifica*, *Trochammina voluta*, *Cribrostomoides batialis*, *C. scitulus*.

Во **второй группе** (ст. 13, 15) снижается численность раковин до 5245 экз./м<sup>2</sup> и сокращается количество видов до 4. Комплекс фораминифер представлен видами *Gl. hanzawai*, *Nonionella japonica*, *Uvigerina parvocostata*, *Valvulineria sadonica*, *D. umbonata*. Все эти виды встречаются 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, что превышает фоновые значения в 100 раз и более. Ранее на этих же станциях в донных колонках обнаружены слои кристаллгидратов с 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./м<sup>2</sup>). На станции 31 отмечено 6 видов (4262 экз./м<sup>2</sup>), резко доминируют *N. labradorica* и *V. sadonica*. На станции 33 встречено также 6 видов (3934 экз./м<sup>2</sup>), 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./м<sup>2</sup>. Полное отсутствие их отмечено на станции 29.

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./м<sup>2</sup>. 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.

Таблица 3  
Содержание изотопов O<sup>18</sup> и C<sup>13</sup> в раковинах бентосных фораминифер, ‰

Table 3

Values of O<sup>18</sup> and C<sup>13</sup> in shells of Foraminifera, ‰

Вид, изотоп	Станция										
	1	3	5	9	11	17	19	23	25	31	33
<i>Nonionellina labradorica</i> , C <sup>13</sup>	-1,44	-1,36	-2,01	-1,79	-1,77	-1,22	-1,88	-1,76	-1,90	-1,17	-1,49
<i>N. labradorica</i> , O <sup>18</sup>	3,35	3,34	3,35	3,28	3,33	3,45	3,39	3,25	3,37	3,38	3,34
<i>Valvulineria sadonica</i> , C <sup>13</sup>	-0,73	-0,85	-1,06	-0,99	-0,72	-0,79	-1,01	-0,76	-0,72	-1,45	-0,98
<i>V. sadonica</i> , O <sup>18</sup>	2,84	2,88	2,85	2,89	2,81	3,02	2,95	3,04	3,04	2,95	2,81
<i>Uvigerina parvocostata</i> , C <sup>13</sup>	-1,03	-0,97	-0,97	-1,24	-1,11	-0,90	-1,01	-1,08	-1,10	-1,03	-0,93
<i>U. parvocostata</i> , O <sup>18</sup>	3,44	3,60	3,47	3,56	3,45	3,50	3,48	3,43	3,43	3,54	3,49
Число раковин	213	330	864	106	136	112	588	744	570	102	58
CH <sub>4</sub> , мл/л	75,4	0,003	0,04	0,01	0,07	0,04	0,07	0,004	0,003	0,20	0,20

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

Более сложная динамика отмечена в изменениях величин δ<sup>13</sup>C, хотя их всех объединяет поле отрицательных значений (табл. 3). Значения δ<sup>13</sup>C изменяются у *U. parvocostata*

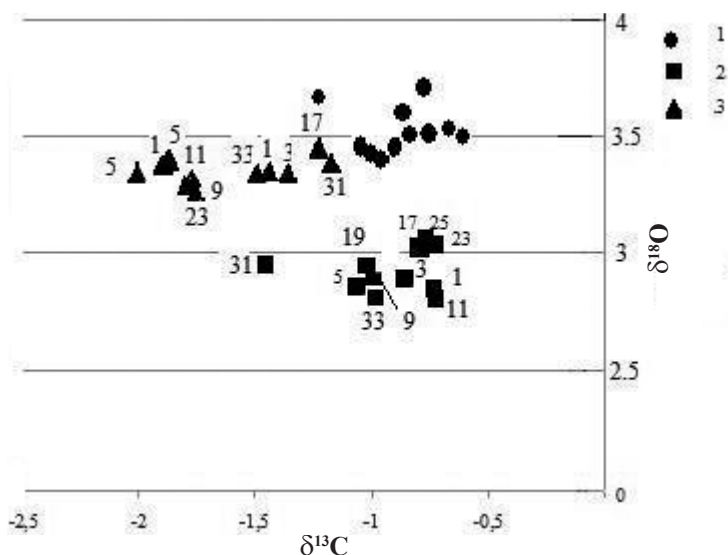


Рис. 2. Изменение содержания изотопов углерода и кислорода (‰) в раковинах фораминифер по станциям: 1 — *Uvigerina peregrina parvocostata*; 2 — *Valvulineria sadonica*; 3 — *Nonionellina labradorica*

Fig. 2. Values of  $O^{18}$  and  $C^{13}$  (‰) in shells of Foraminifera, by stations: 1 — *Uvigerina peregrina parvocostata*; 2 — *Valvulineria sadonica*; 3 — *Nonionellina labradorica*

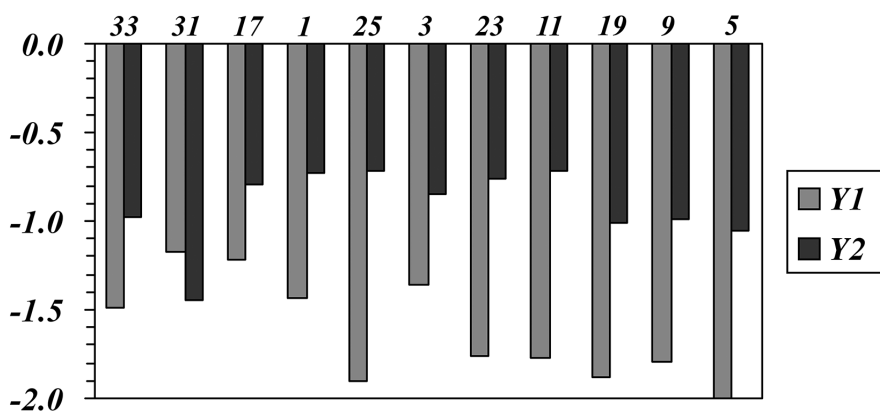


Рис. 3. Изменение значений  $\delta^{13}C$  (‰) в раковинах видов *Nonionellina labradorica* (Y1) и *Valvulineria sadonica* (Y2) на станциях

Fig. 3. Values of  $\delta^{13}C$  (‰) in shells of *Nonionellina labradorica* (Y1) and *Valvulineria sadonica* (Y2), by stations

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  $\delta^{13}C$  у двух последних видов превышают их стандартное отклонение и могут быть обусловлены какими-то локальными факторами природной среды. Ранее было показано, что одни и те же виды фораминифер на разных глубинах мало меняют свои значения  $\delta^{13}C$  и больше зависят от биопродуктивности поверхностных вод, поставки неорганического углерода и микробиологических процессов в донных осадках (McCorkle et al., 1997).

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

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

Линейно по оси абсцисс расположились и станции с изотопами углерода вида *N. labradorica* (см. рис. 2). Однако по сравнению с *V. sadonica* обеднение 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, 2). По-видимому, этот фактор на полигоне и контролирует поле значений  $\delta^{13}C$  вида *N. labradorica*. Ранее было установлено, что снижение содержания изотопа  $C^{13}$  в раковинах данного вида связано с увеличением первичной продукции (Shetye et al., 2011).

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

В современном Охотском море Х.М. Саидовой (1997) выделено 16 глубоководных сообществ бентосных фораминифер, одно из которых, с *U. 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 *U. peregrina parvocostata* также доминируют виды *V. sadonica*, *N. labradorica*, *Gl. hanzawai* и *R. dentaliniformis*. Первые три вида относятся к инфауне и являются показателем высокого органического потока (Smart et al., 1994). Высокая экологическая толерантность отдельных представителей родов *Uvigerina*, *Nonionella*, *Globobulimina* и *Valvulineria* позволяет им не только населять различные биотопы, но и отдельным видам хорошо адаптироваться в местах разгрузки метана (Dickens et al., 1995; Kennett et al., 2000; Ruskin, 2003). Ряд исследователей полагает возможным выделять показательные виды метановых экосистем (Sen Gupta, Aharon, 1994). Обилие раковин планктонного вида *G. bulloides* в поверхностных осадках на полигоне указывает на активизацию процессов апвеллинга и роста первичной продукции. Высокая доля 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*. При дальнейшем рассмотрении 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 (Dickens et al., 1995; Kennett et al., 2000; Ruskin, 2003). На исследуемом полигоне вариации  $\delta^{18}O$  на уровне как одного, так и разных видов 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 менять соотношение изотопов кислорода в раковинах живых фораминифер. Так, например, снижение солености на 2 ‰ в одном из фиордов Шпицбергена вызывает изменение значений  $\delta^{18}O$  в раковинах *N. labradorica* на 0,5–1,0 ‰ (Shetye et al., 2011), а понижение придонной температуры с глубиной от 1000 до 3000 м в Южно-Китайском море уменьшает величину  $\delta^{18}O$  у вида *Cibicidoides wuellerstorfi* на 0,55 ‰ (Cheng et al., 2005).

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 (McCorkle et al., 1997). Доказано, что на снижение значений  $\delta^{13}C$  в раковинах бентоса влияют увеличение биопродуктивности поверхностных вод и содержания метана (Kennett et al., 2000). С этим хорошо согласуются и наши данные. В исследуемом по-



лигоне 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 минимума ( $-1,49\text{‰}$ ) на станции 31.

В наших пробах обилие вида *N. labradorica* обычно совпадает с высокой численностью *Globigerina bulloides* — индикатора 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 значения  $\delta^{13}\text{C}$  *N. labradorica* снижаются от  $-1,7$  до  $-3,2\text{‰}$  (Shetye et al., 2011). 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, а полное их отсутствие — 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 в виде многочисленных облаков газовых пузырьков на 600–1000 м вверх, что фиксируется акустическим профилированием. Это же подтверждается и значительным превышением фоновых значений газа в водной толще (Обжиров, 2011). Почти по всей акватории исследуемого полигона поверхностный слой воды пересыщен метаном по сравнению с атмосферой на 200–300 % с максимумом 1468 % в 2008 г. (Мишукова, Верещагина, 2011). 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: *N. labradorica*, *V. sadonica*, *U. parvocostata* (см. табл. 2). Большая толерантность данных таксонов к разным экологическим обстановкам (Sen Gupta, Aharon, 1994; Smart et al., 1994) 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 — *R. 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 влияют 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

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 фораминиферового анализа наиболее адаптированными к условиям повышенного содержания метана оказались *U. parvocostata*, *V. sadonica*, *N. labradorica* и *R. dentaliniformis*.

Проведен анализ соотношения стабильных изотопов кислорода и углерода в карбонатных раковинах трех бентосных видов. Сравнительный анализ показал, что вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  на уровне как одного, так и разных видов незначительны. Амплитуды значений  $\delta^{18}\text{O}$  по видам *U. parvocostata*, *V. sadonica* и *N. labradorica* равны соответственно 3,43–3,60; 2,81–3,04 и 3,28–3,37 ‰, поэтому при поиске видов-индикаторов результаты анализа соотношения изотопов кислорода, вероятно, имеют второстепенное значение. Большие вариации отмечены по  $\delta^{13}\text{C}$ , значения меняются от –0,9 до –2,0 ‰. При этом отклонение значений  $\delta^{13}\text{C}$  вида *V. sadonica* в зоне активного выхода метана превышает его фоновые вариации и достигает минимума (–1,54 ‰) на станции 31. Значительное обеднение изотопом  $\text{C}^{13}$  фиксируется и в раковинах *N. labradorica*, однако это обусловлено увеличением биопродуктивности, а не метана.

Совместный анализ фораминифер и изотопии их раковин показал, что в исследуемом районе биоиндикатором повышенного содержания метана у дна служит вид *V. sadonica*.

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

### Список литературы

- Зонненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Баранов Б.В. и др.** Подводный газовый источник в Охотском море к западу от острова Парамушир // Океанол. — 1987. — № 5. — С. 795–800.
- Ленин А.Ю., Иванов М.В.** Биогеохимический цикл метана в океане : монография. — М. : Наука, 2009. — 576 с.
- Мишукова Г.И., Верещагина О.Ф.** Распределение метана и его потоков на границе вода-атмосфера на акватории шельфа, склона острова Сахалин и впадины Дерюгина (Охотское море) // Вестн. ДВО РАН. — 2011. — № 6. — С. 64–71.
- Обжиров А.И.** Международная научная экспедиция в Охотском море (рейс 56, август 2011) // Вестн. ДВО РАН. — 2011. — № 6. — С. 124–128.
- Саидова Х.М.** Бентосные фораминиферы Мирового океана : монография. — М. : Наука, 1976. — 159 с.
- Саидова Х.М.** Глубоководные сообщества фораминифер Берингова и Охотского морей // Океанол. — 1997. — Т. 37, № 1. — С. 105–112.
- Соснин В.А., Тищенко П.Я., Салюк А.Н., Бибоу Н.** «Теплый» холодный подповерхностный слой Охотского моря // Метеорол. и гидрол. — 2008. — № 2. — С. 70–77.
- Хусид Т.А., Доманов М.М., Свининников А.И.** Особенности видового состава и распределения фораминифер во впадине Дерюгина (Охотское море) // Изв. РАН. Сер. биол. — 2006. — № 2. — С. 217–224.
- 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.
- 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. — Vladivostok : POI FEBRAS, 2008. — 116 p.
- Cheng X., Huang B., Jian Z. et al.** Foraminiferal isotopic evidence for monsoonal activity in the South China Sea: a present-LGM comparison // Mar. Micropaleontol. — 2005. — Vol. 54. — P. 125–139.
- 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.
- 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.
- McCorkle D.C., Corliss B.H., Farnham C.A.** Vertical distributions and stable isotopic compositions of live (stained) benthic foraminifera from the North Carolina and California continental margins // Deep Sea Res. — 1997. — Vol. 44(6). — P. 983–1024.

**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.

**Ruskin G.** Methane-driven oceanic eruptions and mass extinctions // Geology. — 2003. — Vol. 31, № 9. — P. 741–744.

**Sen Gupta B.K., Aharon P.** Benthic foraminifera of bathyal hydrocarbon vents of the Gulf of Mexico: Initial Report on communities and stable isotopes // Geo-marine Letters. — 1994. — № 14. — P. 88–96.

**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, № 3. — P. 549–558.

**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.

**Zaric 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.

*Поступила в редакцию 8.05.14 г.*