

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЕНТОСНЫХ ФОРАМИНИФЕР И ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

Доманов М.М., Тихонова А.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: domanov@ocean.ru

Статья поступила в редакцию 15.01.2020, одобрена к печати 30.03.2020

Выполнен анализ связи в распределении бентосных фораминифер и естественных радионуклидов (^{232}Th , ^{238}U и ^{226}Ra) в глубоководных осадках Северной Атлантики на разрезе по 60°с.ш. , пересекающем Арктический фронт. Выявлена разнонаправленная корреляция между распределением в осадках естественных радионуклидов и видами *Alabaminella Weddellensis* ($R_s = 0.8$) и *Cibicidoides wuellerstorfi* ($R_s = -0.68$), занимающими разные экологические ниши. Рассчитана взвешенная мощность дозы радиоактивного излучения. Полученные значения дозы находятся в интервале $0.63\text{--}2.16$ $\mu\text{Гр/час}$. Предполагается, что в условиях измеренного радиационного фона, в фораминиферах проявляется эффект радиационного гормезиса, который стимулирует их развитие.

Ключевые слова: донные осадки, фораминиферы, радионуклиды ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra

Введение

Естественная радиоактивность оказывает сложное, многообразное воздействие на биосферу Земли в целом и экосистему океана – в частности (Кузин, 1991; Поликарпов, 1964; Дубинин, 1966). Разнонаправленное влияние радиоактивности на состояние экосистемы, биоразнообразие и обилие мейобентоса в Карском море отмечено в работе (Alexeev, Galtsova, 2012). В глубоководных желобах Карского моря обнаружена корреляция распределения *Saccorhiza ramosa* с концентрацией в осадках естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{210}Pb (Доманов и др., 2017). Связь в распределении бентосных фораминифер и естественных радионуклидов (^{232}Th , ^{238}U и ^{226}Ra) была отмечена при исследовании фаунистического комплекса в осадках Охотского моря (Domanov, Khusid, 2018).

Целью настоящей работы было выявление доминирующих видов фораминифер, характерных для района Северной Атлантики на разрезе по 60°с.ш. , пересекающем Арктический фронт, и сопоставление их распределения с таковым для естественных радионуклидов.

Район работ и методы исследований

Широтный разрез по 60°с.ш. в Северной Атлантике пересекает квазистационарный Арктический фронт с резко изменяющимися гидрологическими, гидрохи-

мическими и гидробиологическими характеристиками среды. Материал для исследования бентосных фораминифер отобран дночерпателем «Океан-50» с площадью захвата 0.25 м² из поверхностного слоя 0–5 см донных осадков Северной Атлантики на широтном разрезе по 60°с.ш. в 51 рейсе НИС «Академик Иоффе». Положение станций и характеристика осадков показаны в табл. 1.

Таблица 1. Координаты станций в районе работ и характеристика осадков

№ станции	Широта, с.ш.	Долгота, з.д.	Глубина, м	Горизонт, см	Тип осадка
1	59°29.946'	11°20.031'	1611	0–5	Серо-коричневый алеврито-пелитовый ил, фораминиферовый
2	59°29.901'	20°41.678'	2825	0–5	Коричневый пелит с примесью мелкого алеврита
3	59°30.31'	24°42.96'	2517	0–5	Коричневый песок с примесью пелита, фораминиферовый
4	59°29.930'	26°39.604'	2237	0–5	Темно-серо-коричневый алеврито-пелитовый ил, фораминиферовый
5	59°30	28°39.97'	1694	0–5	Оливково-коричневый песчано-пелитовый ил, фораминиферовый
6	59°30.235'	34°58.918'	3064	0–5	Светло-коричневый мелкий алеврит, фораминиферовый
7	59°30.168'	39°19.868'	2922	0–5	Светло-коричневый, алеврито-пелитовый, фораминиферовый
8	59°33.760'	41°00.463'	2399	0–5	Светло-коричневый алеврит с примесью песка, фораминиферовый
9	59°53.771'	42°18.899'	328	0–5	Светло-коричневый алеврит с песчаной примесью, фораминиферовый
10	59°06.69'	50°30.649'	3477	0–5	Светло-коричневый пелит, фораминиферовый

Поверхностный слой осадков в основном представлен известковым кокколи-то-фораминиферовым песком различной размерности. Измерения концентрации ²²⁶Ra, ²³⁸U, ²³²Th в осадке выполнены в лаборатории Дозиметрии и радиоактивности окружающей среды Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова с помощью гамма-спектрометра с детектором из сверхчистого германия GC-3020 с относительной эффективностью по линии кобальта-60 (1.332 МэВ), равной 30%, и разрешением по этой линии 1.8 КэВ. Точность определения ²²⁶Ra – 4–7%, ²³²Th – 7–12%, ²³⁸U – 13%.

Взвешенная мощность дозы радиоактивного излучения (μГр/час) рассчитана по программе ERICA 1.2 (ERICA, 2006). Для исследования фораминифер пробу

осадка промывали через сито с ячейей 50 мк. При определении и подсчете особей фораминифер осадок просматривали под бинокулярным микроскопом Leica Wild МЗС (Leica Microsystems, Швейцария). Для выяснения состава и структуры сообществ фораминифер использовали весь комплекс найденных видов фораминифер. Таксономическое исследование базируется на классификации, предложенной (Loeblich, Tappan, 1987).

Результаты и обсуждение

В исследованном районе доминируют виды фаунистического ансамбля *Epistominella exigua* – *Alabaminella weddellensis*, с относительной численностью до 62 и 17.2% соответственно. Эти виды характерны для субполярных регионов (Xichun, Bruce et al., 2006). Другие виды с меньшей численностью представлены *Cibicidoides wuellerstorfi*, *Cassidulina reniforme*, *Cassidulina teretis*, *Cassidulina laevigata*, *Globocassidulina subglobosa* и *Trifarina angulosa*. Видовой состав и численность доминирующих видов бентосных фораминифер приведены в таблице 2.

Таблица 2. Численность в % доминирующих видов бентосных фораминифер

Станция	<i>C. wuellerstorfi</i>	<i>C. teretis</i>	<i>C. laevigata</i>	<i>C. reniforme</i>	<i>E. exigua</i>	<i>A. weddellensis</i>	<i>T. angulosa</i>	<i>G. subglobosa</i>	Сумма доминантов	Прочие	число видов
3527	3.3	8.6	13.4	12	1.4	10	4.8	9.6	63.2	36.8	30
3545	1.3	0	0.6	1.9	61.9	8.8	0.6	0	75.0	25.0	21
3556	0	0	0	1.3	40.1	17.2	1.3	0	59.9	40.1	23
3562	23.2	3.8	2.7	1.1	24.9	1.6	0	1.1	58.4	41.6	30
3568	3.0	26.1	4.0	1.0	18.6	14.1	4.5	0	71.4	28.6	28
3586	11.9	0	0.6	5	15.1	3.8	0	13.8	50.3	49.7	27
3593	5.2	0	0.5	3.6	24.9	7.8	0.5	0	42.5	57.5	40
3597	14.1	4.3	3.3	4.3	4.9	8.7	0	2.2	41.8	58.2	34
3613	0.8	6.5	6.3	11.5	0.8	6.3	3.3	0	35.3	64.7	37
3635	7.9	0	0	0	27.8	12.6	0	0	48.3	51.7	28

Концентрация радионуклидов ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и взвешенная мощность дозы, рассчитанная по программе ERICA 1.2 (ERICA, 2006) для фораминифер в поверхностном слое осадков, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Концентрация радионуклидов ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и взвешенная мощность дозы для фораминифер в поверхностном слое осадков

Станция	^{226}Ra , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	^{238}U , Бк/кг	Взвешенная мощность дозы, $\mu\text{Гр/ч}$
3527	44.7	3.0	3.8	1.32
3545	40.2	4.1	4.6	1.23
3556	72.1	7.2	5.9	2.16
3562	25.0	5.0	6.8	0.76
3568	68.4	5.9	5.8	2.0
3586	20.3	5.7	6.8	0.63
3593	40.1	14.4	7.4	1.2
3597	23	4.2	4.7	0.7
3613	45.1	15.1	10.1	1.39
3635	64.5	10.6	7.9	1.94

Численность фораминифер вида *A. weddellensis* и *C. wuellerstorfi* была сопоставлена с концентрацией ^{226}Ra , количеством песчаной (0.5–0.25 мм) и пелитовой (<0.001 мм) фракций осадков, таблица 4.

Таблица 4. Численность фораминифер, размерности фракций и концентрации ^{226}Ra

Станции	Относительная численность, %		Размер фракции, мм		^{226}Ra , Бк/кг
	<i>A. weddellensis</i>	<i>C. wuellerstorfi</i>	0.5–0.25	<0.001	
3527	10.05	3.35	0.87	24.21	44.7
3545	8.75	1.25	11.93	29.39	40.0
3556	17.20	0.00	0.23	44.1	72.0
3562	1.62	23.24	16.42	21.23	25.0
3568	14.07	3.02	5.82	43.24	68.0
3586	3.77	11.95	10.37	18.46	30.1
3593	7.77	5.18	1.91	26.06	48.5
3597	8.70	14.13	13.01	5.8	23.0
3613	6.27	0.75	4.95	4.09	45.0
3635	12.58	7.95	0.68	44.9	64.0

При этом было найдено, что численности фораминифер вида *A. weddellensis* и *C. wuellerstorfi* по-разному коррелятивно связаны с концентрацией ^{226}Ra (таблица 5). Численность вида *A. weddellensis* возрастает при увеличении концентрации ^{226}Ra в осадке. Для этой зависимости коэффициент ранговой корреляции Спирмена R_s равен 0.73, критическое значение $R_{\text{скр.}}$ равно 0.64. Относительное обилие вида *C. wuellerstorfi* снижается с увеличением концентрации ^{226}Ra ($R_s = -0.68$, $R_{\text{скр.}} = 0.64$).

Таблица 5. Корреляционная матрица связи размерности фракций, численности видов и концентрации ^{226}Ra

	Виды		Размер фракции, мм		^{226}Ra , Бк/кг
	<i>A. weddellensis</i>	<i>C. wuellerstorfi</i>	0.5–0.25	<0.001	
<i>A. weddellensis</i>	1	–	–0.65	0.77	0.73
<i>C. wuellerstorfi</i>	–	1	0.65	–	–0.68
0.5–0.25	–0.65	0.65	1	–	–0.82
<0.001	0.77	–	–	1	0.81
^{226}Ra , Бк/кг	0.73	–0.68	–0.82	0.81	1

Причины существования специфичной связи *C. wuellerstorfi* и *A. weddellensis* с естественной радиоактивностью обусловлены рядом факторов, включающих в себя комплекс биоценологических связей и требований к факторам среды обитания этих видов.

Фитодетритовый, сезонный *A. weddellensis*, развивается в прослойке фитодетрита, который является источником питания для этого вида (Gooday, Lambshead, 1989). Коэффициент корреляции численности *A. weddellensis* с количеством фракции <0,001 мм, в которой содержится фитодетрит, $R_s = 0.77$. Условия концентрирования радия в среде обитания *A. weddellensis* наиболее оптимальны, поскольку фитодетрит активно абсорбирует ^{226}Ra из морской воды в процессе осаждения и накапливает его в фитодетритовой прослойке. Концентрация ^{226}Ra в осадке возрастает с увеличением количества пелитовой фракции <0,001 мм. Коэффициент корреляции содержания Ra с количеством фракции <0.001 мм в осадке, где обитает *A. Weddellensis* равен 0.81.

C. wuellerstorfi может быть рассмотрен как настоящий эпибентосный вид. Этот вид, предпочитающий условия высокой гидродинамики (Linke, Lutze, 1993) и питающийся взвесью из обтекающего его потока, прикрепляется к скелетам губок, камням, гидроидам и другим предметам или организмам, возвышающимся над осадком. Он развивается при наличии придонной адвекции (Lutze, Thiel, 1989). В условиях высокой гидродинамики, отвечающих среде обитания *C. wuellerstorfi*, накопление высокодисперсного осадка, содержащего радионуклиды повышенной концентрации, затруднено, ввиду сноса его в места с менее развитой гидродинамикой. Поэтому, чем интенсивней гидродинамика, тем оптимальней условия питания *C. wuellerstorfi*, но хуже условия для накопления радионуклидов. Численность *C. wuellerstorfi* положительно коррелирует с песчаной фракцией осадка 0.5–0.25 мм ($R_s = 0.65$). Однако в песчаной фракции 0.5–0.25 мм ^{226}Ra не накапливается и его концентрация в осадке уменьшается с увеличением содержания этой фракции: коэффициент корреляции ($R_s = -0.82$). В результате относительное обилие *C. wuellerstorfi* снижается с увеличением концентрации ^{226}Ra ($R_s = -0.68$).

Экспериментальные данные, обобщённые в работе (Planel et al., 1987) показали, что низкие значения мощности дозы гамма-излучения (менее 5.7 $\mu\text{Гр/час}$)

могут стимулировать развитие различных организмов. Значения мощности дозы облучения, полученные в нашей работе, близки к значениям доз, при которых наблюдали стимуляцию роста *Synechococcus lividus* (мощность дозы 2.41 $\mu\text{Гр/час}$) (Planel, Soleilhavouir et al., 1987) и гетеротрофных бактерий (мощность дозы 3.07 $\mu\text{Гр/час}$) (Доманов и др., 2015). Таким образом, можно ожидать, что у отдельных видов фораминифер в условиях измеренного радиационного фона, проявляется эффект радиационного гормезиса, который стимулирует их развитие. Возможно также, что повышенное содержание ^{226}Ra в осадке способствует развитию гетеротрофных бактерий в фитодетритном слое, обилие которых обеспечивает (в качестве пищи) более интенсивное развитие видов фораминифер, обитающих в фитодетритовом слое.

Заключение

Анализ данных о составе сообщества фораминифер и концентрациях радионуклидов позволил выявить разнонаправленную корреляцию между распределением в осадках естественных радионуклидов и численностью видов, занимающих разные экологические ниши в природной системе со сложными прямыми и обратными связями. Показано, что величина мощности дозы излучения естественных радионуклидов находится в пределах интервала доз, стимулирующих развитие биоты. Предполагается, что положительный эффект стимулирования развития гетеротрофных бактерий дополнительно увеличивает количество пищи доступной для питания фораминифер.

Работа выполнена по теме госзадания ИО РАН № 0149-2019-0008, № 0149-2019-0007.

Литература

- Доманов М.М., Москвина М.И., Ильинский В.В. Развитие популяции морских гетеротрофных бактерий при облучении ^{226}Ra , содержащегося в естественном барите / Материалы Международной научной конференции «Радиобиология: Маяк», Чернобыль, Фукусима = Radiobiology: «Mayak», Chernobyl, Fukushima: (Гомель, 24–25 сент. 2015). Гомель: Ин-т радиологии, С. 76–80.
- Доманов М.М., Хусид Т.А., Либина Н. В. Бентосные фораминиферы в глубоководных желобах Карского моря и связь вида *Saccorhiza ramosa* с распределением естественных радионуклидов // Изв. РАН. Сер. Биол. М.: 2017. № 2. С. 1–7.
- Дубинин Н. П. Эволюция популяций и радиация. М.: Атомиздат, 1966. 744 с.
- Кузин А.М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. М.: Наука, 1991. 116 с.
- Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов. М.: Атомиздат, 1964. 295 с.
- Alexeev D.K., Galtsova V.V. Effect of radioactive pollution on the biodiversity of marine benthic ecosystems of the Russian Arctic shelf // Polar Sci., 2012. No. 6. P. 183–195.

- Domanov M.M., Khusid T.A.* Some Peculiarities of foraminifera species distribution associated with concentrations of ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th in the Deryugin Basin (the Sea of Okhotsk) // J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2018. No. 4. P. 1–10.
- Goody A.J., Lambshead P.J.D.* Influence of seasonally deposited phytodetritus on benthic foraminiferal populations in the bathyal northeast Atlantic // Mar. Ecol. Prog. Ser., 1989. Vol. 58. P. 53–67.
- Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management (ERICA). Deliverable 5. Derivation of predicted-no-effect-dose-rate values for ecosystems (and their suborganisational levels) exposed to radioactive substances / Eds J. Garnier Laplace and R. Gilbin. Bristol, UK: Eur Environ. Agency, 2006. 88 p.
- Linke P., Lutze G.F.* Microhabitat preferences of benthic foraminifera – a static concept or a dynamic adaptation to optimize food acquisition? // Mar. Micropaleontol. Elsevier, 1993. Vol. 20. No. 3–4. P. 215–234.
- Loeblich A.R., Tappan H.* Foraminiferal genera and their classification. Vol. 1. No. 2. N.Y.: Van Nostrand Reinhold, 1987. 970 p.
- Lutze G.F., Thiel H.* Epibenthic foraminifera from elevated microhabitats: *Cibicidoides wuellerstorfi* and *Planulina ariminensis* // J. Foraminiferal Res., 1989. Vol. 19. No. 2. P. 153–158.
- Planel H., Soleilhavoup J.P., Tixador R., Richoille G., Conter A., Croute F., Caratero C., Gaubin Y.* Influence on Cell Proliferation of Background Radiation or Exposure to Very Low, Chronic Gamma Radiation // Health Physics Society, 1987. Vol. 52. No. 5. P. 571–578.
- Xichun Sun, Corliss B.H., Brown C.W., Showers W.J.* The effect of primary productivity and seasonality on the distribution of deep-sea benthic foraminifera in the North Atlantic // Deep-Sea Research, 2006. No. 1. 53. P. 28–47.

SOME PECULIARITIES OF THE BENTHIC FORAMINIFERA AND NATURAL RADIONUCLIDES DISTRIBUTION IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE NORTHERN ATLANTIC

Domanov M.M., Tikhonova A.V.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: domanov@ocean.ru
Submitted 15.01.2020, accepted 30.03.2020*

The analysis of the relationship of benthic foraminifera and of natural radionuclides (^{232}Th , ^{238}U and ^{226}Ra) distribution in the deep-water sediments of the North Atlantic in the section of 60°N crossing the arctic front is fulfilled. A oppositely directed correlation between the distribution of natural radionuclides in sediments and *Alabaminella Weddellensis* ($R_s = 0.8$) and *Cibicidoides wuellerstorfi* (Schwager, 1866) ($R_s = -0.68$) species occupying different ecological niches was revealed. The weighted radiation dose is calculated. The dose values obtained are in the range of 0.63–2.16 $\mu\text{Gr}/\text{hour}$. It is assumed that under the conditions of measured background radiation, the effect of radiation hormesis in foraminifera manifests itself, stimulating their development.

Keywords: bottom sediments, foraminifera, radionuclides ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra

Acknowledgments: The work was carried out on the topic of the State assignments of the IO RAS No. 0149-2019-0008, No. 0149-2019-0007.

References

- Alexeev D.K. and Galtsova V.V. Effect of radioactive pollution on the biodiversity of marine benthic ecosystems of the Russian Arctic shelf. *Polar Sci.*, 2012, No. 6, pp. 183–195.
- Domanov M.M., Moskvina M.I., and Il'inskii V.V. Development of populations of marine heterotrophic bacteria irradiated with ^{226}Ra contained in natural barite, in Mater. Mezhdunar. nauch. konf. (Proc. Int. Sci. Conf.), Gomel': Inst. Radiologii, 2015, pp. 76–80.
- Domanov M.M., Khusid T.A., and Libina N.V. Benthic Foraminifera in Deep Trenches of the Kara Sea and the Relation of *Saccorhiza ramosa* (Brady) to the Distribution of Natural Radionuclides. *Biology Bulletin*, 2017, Vol. 44, No. 2, pp. 187–192. Inc., 2017. Pleades Publishing.
- Domanov M.M. and Khusid T.A. Some Peculiarities of foraminifera species distribution associated with concentrations of ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th in the Deryugin Basin (the Sea of Okhotsk). *J. Sib. Fed. Univ. Biol.*, 2018, No. 4, pp. 1–10.
- Dubinina N.P. Evoluciya populyatsiy i radiatsiya. Moscow: Atomizdat, 1966, 744 p.
- Goody A.J. and Lambshead P.J.D. Influence of seasonally deposited phytodetritus on benthic foraminiferal populations in the bathyal northeast Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1989, Vol. 58, pp. 53–67.
- Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management (ERICA). Deliverable 5. Derivation of predicted-no-effect-dose-rate values for ecosystems (and their suborganisational levels) exposed to radioactive substances. Eds J. Garnier Laplace and R. Gilbin. Bristol, UK: Eur Environ. Agency, 2006, 88 p.
- Kuzin A.M. Prirodnyi radioaktivnyi fon i ego znachenie dlya biosfery Zemli. Moscow: Nauka, 1991, 116 p.
- Linke P. and Lutze G. F. Microhabitat preferences of benthic foraminifera – a static concept or a dynamic adaptation to optimize food acquisition? *Mar. Micropaleontol.*, Elsevier, 1993, Vol. 20, No. 3–4, pp. 215–234.
- Loeblich A.R. and Tappan H. Foraminiferal genera and their classification. Vol. 1, No. 2, N.Y.: Van Nostrand Reinhold, 1987, 970 p.
- Lutze G.F. and Thiel H. Epibenthic foraminifera from elevated microhabitats: *Cibicides wuellerstorfi* and *Planulina ariminensis*. *J. Foraminiferal Res.*, 1989, Vol. 19, No. 2, pp. 153–158.
- Planel H., Soleilhavoup J.P., Tixador R., Richoille G., Conter A., Croute F., Caratero C., and Gaubin Y. Influence on Cell Proliferation of Background Radiation or Exposure to Very Low, Chronic Gamma Radiation. *Health Physics Society*, 1987, Vol. 52, No. 5, pp. 571–578.
- Polikarpov G.G. Radioekologiya morskikh organizmov. Moscow: Atomizdat, 1964, 295 p.
- Xichun Sun, Corliss B.H., Brown C.W., and Showers W.J. The effect of primary productivity and seasonality on the distribution of deep-sea benthic foraminifera in the North Atlantic. *Deep-Sea Research*, 2006, Vol. 1, No. 53, pp. 28–47.