

*Д.В. Кириевская, О.А. Кийко, М.Б. Шилин*

## **ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДОННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ**

*D.V. Kirievskaya, O.A. Kiyko, M.B. Shilin*

## **THE ASSESSMENT OF CONTEMPORARY CONDITION OF THE BOTTOM ECOSYSTEM OF SOUTHEASTERN CHUKCHI SEA**

*Рассматриваются возможности комплексной оценки экосистемы Чукотского моря на основе изучения донных отложений и бентоса с учетом их геоморфологической позиции. Построена геоэкологическая карта-схема донных биогеоценозов Чукотского моря. Результаты проведенной оценки могут быть использованы при разработке природоохранных мероприятий.*

*Ключевые слова: Чукотское море, экосистема, донные осадки, бентос, комплексная оценка.*

*Perspectives of the complex assessment of the Chukchi Sea ecosystem based on the studying sediments and benthos given their geo-morphological position are examined. Geoecological schematic map of bottom biogeocenoses of the Chukchi Sea has been created. The results of the assessment can be used for development of environmental protection measures.*

*Key words: the Chukchi Sea, ecosystem, bottom sediments, benthos, assessment.*

### **Введение**

Основной угрозой ухудшения состояния Арктических морских экосистем является антропогенное воздействие в результате разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Несмотря на то, что Чукотский сектор не является высокоприоритетным в «Программе разведки континентального шельфа Российской Федерации на период с 2012 по 2030 гг.», он требует детального изучения, так как подвержен загрязнению в результате хозяйственной деятельности в Аляскинском промышленном секторе и на российском побережье Чукотского п-ва. Кроме того, имеет место поступление загрязняющих веществ через Берингов пролив с атмосферным переносом [4].

До настоящего времени комплексных и крупномасштабных экологических исследований российской части Чукотского моря не проводилось. Американский сектор Чукотского моря изучен гораздо более подробно. Актуальной задачей является преодоление отставания в изученности российской части данной акватории, осу-

ществление комплексной геоэкологической оценки российской части Чукотского моря, в том числе и для использования полученной информации в качестве «фоновой» (эталонной) для морей Восточной Арктики. Кроме того, по оценкам ряда экспертов [1], возможно, что в будущем юго-восточная часть Чукотского моря станет третьим из арктических морей России (после Баренцева и Карского), где начнется разработка углеводородного сырья. С этой точки зрения также важна оценка фоновое экологического состояния морской экосистемы Чукотского моря до начала геологоразведочных работ и освоения месторождений. Фактически, это и составляет основную цель настоящего исследования.

В основе оценки фонового состояния морской экосистемы, контроля загрязнения и мониторинга среды лежит анализ ведущих компонентов геоэкологической среды: рельефа дна, современных донных отложений, а также биоты [6]. Донные осадки (отложения) относятся к консервативной системе и способны накапливать и хранить информацию о состоянии и изменении геохимических, динамических, климатических, неотектонических условий среды, процессов массопереноса, в том числе, вызванных техногенным воздействием [6]. Бентос (донные организмы) как живой компонент экосистемы более изменчив во времени, чем донные отложения, но по сравнению с другими группами организмов наиболее стабилен во времени, характеризует локальную ситуацию в пространстве и способен представить изменения экосистемы в ретроспективе [8].

### **Материалы и методы исследований**

Пробы поверхностных донных отложений получены в 2006 и 2009 гг. в рамках государственной геологической съёмки шельфа Чукотского моря и совместного российско-американского экспедиционного проекта «РУСАЛКА».

Для построения карты-схемы распределения донных сообществ использованы сборы макрозообентоса, полученные в августе-сентябре 1995 г. с борта американского НИС «Альфа Хеликс» и в августе-сентябре 2006 г. – с борта морского буксира «Шуя», а также литературные данные [5, 9, 12].

С целью изучения геохимического состава проб донных осадков проведен их анализ. Валовое содержание Cu и Cd определялось с помощью атомно-абсорбционного метода; валовое содержание Sr, Co, Ni, Zr, V, Ba, Cr, Pb, Zn, Ga, Ti, Mn и Hg – эмиссионным методом; содержание подвижных форм тяжелых металлов – атомно-абсорбционным методом. Содержание органического и общего углерода определялось на C/N анализаторе (Vario EL III, Elementar). Для проб донных осадков был проведён 12-фракционный гранулометрический анализ по методике Петелина [7]. Во фракции 0,1-0,05 мм иммерсионным методом анализировались минералы.

При разборе проб макрозообентоса использовался стандартный гидробиологический метод [8]: материал разбирался по видам и группам, производился подсчет численности организмов и определение биомассы с точностью до 0,01 г. При определении видов проводились консультации со специалистами Санкт-Петербургского университета и Зоологического института РАН. Донные сообщества выделялись по доминирующим по биомассе видам. Построение границ сообществ осуществлялось на геоморфологической основе.

Полученные в ходе исследований морфодинамические и литохимические параметры использовались для выявления участков, наиболее благоприятных для накопления поллютантов, выделенных на основе критериев, приведенных в [2]. На основе результатов геохимического анализа был рассчитан суммарный индекс загрязнения донных осадков  $Z_c$  по Е.П. Янину [3]. Внутри выделенных биогеоценозов был определен возможный биологический эффект вредного воздействия загрязняющих веществ на биоту донной экосистемы Чукотского моря с использованием критериев пороговых уровней концентраций [11]. По результатам исследований, создана геоэкологическая карта-схема донных биогеоценозов на ландшафтно-геохимической основе.

## Результаты

*Поверхностные донные осадки Чукотского моря.* В ходе исследования установлена общая закономерность распределения донных отложений: с увеличением глубины материал становится более мелкозернистым. В прибрежной зоне у Азиатского материка, в районе острова Врангеля, в районе центральных банок и на банке Геральд преобладают галька, гравий, песок. Большую часть южной и средней области моря занимают пелитовые и алевропелитовые отложения.

На основе минералогического анализа донных образцов установлено, что в осадках Чукотского моря породообразующими минералами являются кварц и полевые шпаты, причем среди последних преобладают калиевые полевые шпаты. Валовое содержание металлов в донных отложениях, определенное по результатам донного опробования, приведено в табл. 1.

Все коэффициенты вариации (относительного показателя разнообразия признаков) низкие. Немного повышенные значения – у Hg, аномально высокие – у Mn. Последнее, скорее всего, связано с распространением железомарганцевых конкреций на морском дне. Кларк концентрации металлов в донных осадках, нормированный по североамериканскому сланцу (кларк NASC) [10], – не высокий (см. табл. 1), за исключением Sr (1,24) и Cd (4,33), что, скорее всего, объясняется природными факторами. Так, высокие значения кларка концентрации Sr во многом обусловлены биогенным фактором (Sr накапливают кораллы, мшанки, моллюски и офиуры). Также Sr могут содержать некоторые минералы, например, барит. Высокие значения Cd объясняются химизмом пород, питающих провинции, накоплением тонкодисперсными осадками, а возможно, и его присутствием в минералах (барите и проч.). Тяжелые металлы в донных отложениях располагаются в следующий ряд (в порядке возрастания подвижности):  $Ni \leq Cd < Co \leq Pb < Zn < Fe < Cu < Mn$ .

Содержание общего углерода в донных осадках распределяется от 0,18 до 2,49 %, со средним значением – 1,41%. Содержание органического углерода распределяется от 0,16% до 2,27% со средней концентрацией 1,22%. Содержание углерода в донных осадках зависит от их гранулометрического состава. Наименьше содержание углерода отмечается в песках, наибольшее – в пелитах. Рельеф также оказывает влияние на распределение углерода: на склонах его содержание в донных осадках ниже, чем в депрессиях («геомофлогических ловушках»).

**Данные статистики по валовому содержанию химических элементов в донных осадках Чукотского моря**

Микроэлементы	Sr	Co	Ni	Cu	Zr	V	Ba
Среднее значение, мг/кг	176	9	33	40	103	98	559
Стандартное отклонение	49	3,6	9	8	24	30	114
Минимум, мг/кг	80	5	18	27	47	27	280
Максимум, мг/кг	300	35	58	67	170	150	1000
Коэффициент вариации	28	40	26	21	23	31	20
Кларк NASC	142	26	60	60	190	120	640
Кларк концентрации (с учётом кларка NASC)	1,24	0,4	0,6	0,7	0,5	0,8	0,9

Микроэлементы	Cr	Cd	Pb	Zn	Ga	Ti	Mn	Hg
Среднее значение, мг/кг	78	1,3	14	60	8,11	2909	248	0,007
Стандартное отклонение	32	0,5	4,33	27	1,85	649	477	0,004
Минимум, мг/кг	32	0,27	7	25	4	1400	80	0,005
Максимум, мг/кг	250	2,8	32	150	13	5200	3900	0,02
Коэффициент вариации	41	39	31	45	23	22	193	55
Кларк NASC	124	0,3	20	90	30	4200	465	не опр.
Кларк концентрации (с учётом кларка NASC)	0,6	4,3	0,7	0,7	0,3	0,7	0,5	не опр.

*Донные сообщества Чукотского моря.* На изученной акватории выделено 7 крупных донных сообществ: 1 – сообщество видов-обрастателей с доминированием асцидий, мшанок и губок подводного берегового склона в зоне современного волнового воздействия; 2 – сообщество офиур *Ophiura sarsi*, *Ophiocten sericeum* и двустворчатых моллюсков *Yoldia hyperborea*, *Macoma calcarea* на абразионных террасах, склонах и вершинах подводных возвышенностей; 3 – сообщество двустворчатых моллюсков *Yoldia hyperborea*, *Macoma calcarea* и *Astarte sp.* плоских аккумулятивных равнин; 4 – сообщество двустворчатых моллюсков *Eunnicula tenuis* и *Macoma calcarea* плоских аккумулятивных равнин; 5 – сообщество двустворчатых моллюсков рода *Nuculana* и офиур *Ophiura sarsi* плоских аккумулятивных равнин; 6 – сообщество двустворчатых моллюсков рода *Nuculana* и многощетинковых червей *Maldane sarsi* илистых равнин днищ замкнутых впадин; 7 – сообщество грунтоедов, с доминированием червей *Golfingia sp.*, *Echiurus sp.*, *Maldanidae var.* и морских звезд *Stenodiscus crispatus* абразионно-аккумулятивных и аккумулятивных склонов.

Диаграмма суммарной численности (рис. 1) и диаграмма суммарной биомассы (рис. 2) макробентоса показывает, что самая высокая его численность отмечается в сообществах 4 (995,0 экз./м<sup>2</sup>) и 3 (910,0 экз./м<sup>2</sup>), представленных двустворчатыми моллюсками и занимающих Южно-Чукотскую равнину, с глубинами 30-50 м и

пелито-алевритовыми, алеврито-пелитовыми и пелитовыми осадками. Сообщество 4, имеющее самую высокую плотность, обладает и самой высокой биомассой (893,0 г/м<sup>2</sup>). Также высокой биомассой (648,0 г/м<sup>2</sup>) обладает сообщество 1, представленное не столь многочисленными, но крупными для бентосных организмов видами – обрастателями, заселяющими прибрежную зону с песчаными и гравийно-галечными осадками. Сообщество 5, обладающее самой низкой численностью, имеет и самую низкую биомассу (81,2 г/м<sup>2</sup>). Относительно невысокой биомассой (138,0 г/м<sup>2</sup>) характеризуются также сообщество 2 с доминированием офиур, расположенное в районе абразионных террас и песчаных банок, и сообщество 6 (137,6 г/м<sup>2</sup>), приуроченное к геоморфологической «ловушке», представленное многощетинковыми червями и двустворчатыми моллюсками. Сравнение результатов исследования макрозообентоса 2006 г. с предыдущими наблюдениями не выявило существенных различий в видовом составе и значениях плотности и биомассы сообществ.

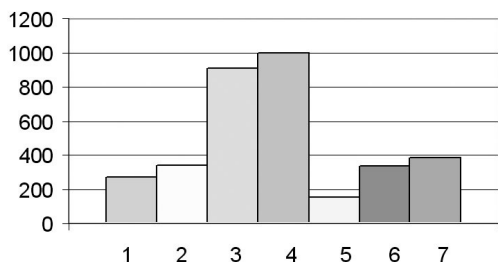


Рис. 1. Суммарная численность макробентоса по сообществам (вертикальная ось – суммарная численность, экз./м<sup>2</sup>; горизонтальная ось – номер сообщества)

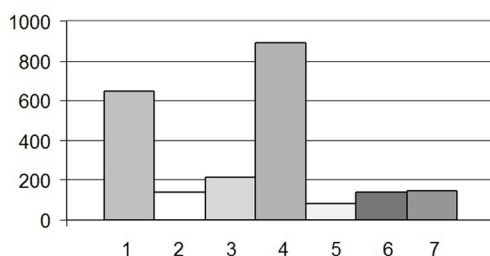


Рис. 2. Суммарная биомасса макробентоса по сообществам (вертикальная ось – суммарная биомасса, г/м<sup>2</sup>; горизонтальная ось – номер сообщества)

Для выявления возможной связи содержания микроэлементов с распределением бентосных организмов были рассчитаны содержания Sr, Co, Ni, Cu, Zr, V, Ba, Cr, Cd, Pb, Zn, Ga, Ti, Mn и Hg внутри сообществ (табл. 2, рис. 3).

Анализ содержаний микроэлементов в донных осадках биогеоценозов (табл. 2) не выявил зависимости распределения бентосных сообществ от распределения тяжелых металлов в донных отложениях. На распределение бентоса основополагающее влияние оказывают рельеф и субстрат.

*Геоэкологическое состояние донной экосистемы Чукотского моря.* Расчёт индекса загрязнения донных осадков показал, что на всей изученной акватории Чукотского моря уровень техногенного загрязнения низкий ( $Z_c < 10$ ). Исключение составил лишь небольшой участок, расположенный между островами Врангеля и Геральда, где суммарный индекс загрязнения донных осадков средний ( $Z_c = 14,32$ ), но здесь решающую роль играет не техногенный фактор, а природный – наличие железомарганцевых конкреций обуславливает высокий коэффициент концентрации Mn. Биота, представленная кораллами, мшанками, двустворчатыми моллюсками и офиурами, способствует высокому содержанию здесь Sr. Что касается высокого значения Cd, то это характерно для донных осадков всего Чукотского моря.

Среднее содержание микроэлементов внутри выделенных бентосных сообществ Чукотского моря, в г/т

Биогеоценоз	Sr	Co	Ni	Cu	Zr	V	Ba
1	100	6,5	41	33	124	62	365
2.1 (вокруг Чукотского п-ов)	150	8	25	31	110	28	550
2.2 (вокруг о. Врангеля)	137	7,27	30	43	86	88	575
3	175	9,22	31	39	101	96	609
4	218	8,82	40	39	107	116	512
6	210	9,6	30	38	116	103	646
7	171	9,42	33	41	104	98	551

Биогеоценоз	Cr	Cd	Pb	Zn	Ga	Ti	Mn	Hg
1	56	0,32	9	50	5	1950	200	0,009
2.1 (вокруг Чукотского п-ов)	38	0,52	18	50	7	1400	80	0,01
2.2 (вокруг о. Врангеля)	85	1,27	10	53	8,18	3227	107	0,008
3	78	1,44	17	74	8	2644	199	0,007
4	66	1,66	14	62	9	3235	259	0,009
6	71	1,4	19	88	8,2	2480	230	0,007
7	85	1,16	13	51	7,95	2982	320	0,006

Вероятность образования скоплений загрязняющих веществ в донных осадках не одинакова. На большей площади она низка. Условия для образования крупных скоплений отмечено в районе Южно-Чукотской котловины, прилегающей к верховьям желоба Геральда. С учетом того, что превышения кларков осадочных пород по данным NASC (1984) локальны (за исключением Sr и Cd) и обусловлены естественными факторами, а вся Российская часть моря относится к малоосвоенным районам, эколого-геологическая обстановка исследуемой акватории может оцениваться как благоприятная.

Содержание Zn, Cu, Pb, Ni, Cd и Hg, в донных осадках биогеоценозов ниже критериев возможного биологического воздействия. Вредное влияние исследованных веществ в данных концентрациях на бентосные сообщества маловероятно.

В результате обобщения вышеизложенных материалов (геоморфологии, геохимии и гранулометрии донных отложений, количественного и качественного состава бентоса) построена геоэкологическая карта-схема Чукотского моря (рис.3).

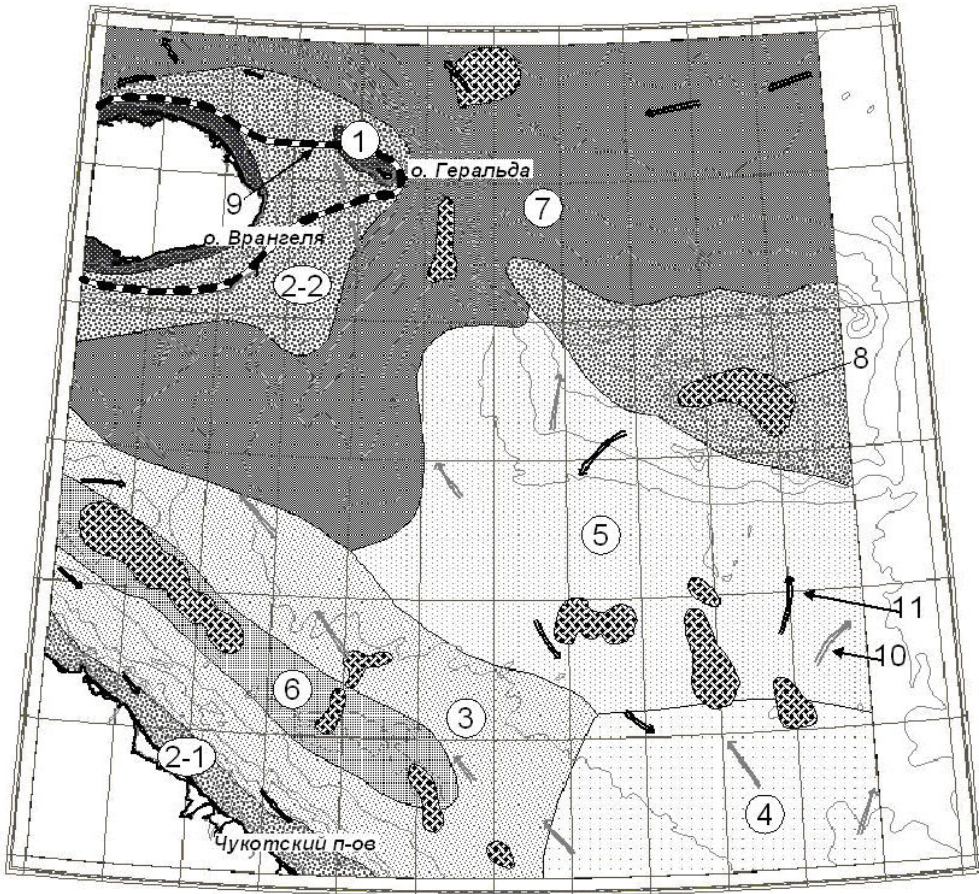


Рис. 3. Геоэкологическая карта-схема донных биоеценозов Чукотского моря  
 Бентосные биоеценозы с 1 – 7: 1 – сообщество видов – обрастателей с доминированием асцидий, мшанок и губок подводного берегового склона в зоне современного волнового воздействия; 2 – сообщество офиур *O. sarsi*, *O. sericeum* и двустворчатых моллюсков *Y. hyperborea*, *M. calcarea* на абразионных террасах, склонах и вершинах подводных возвышенностей; 3 – сообщество двустворчатых моллюсков *Y. hyperborea*, *M. calcarea* и *Astarte sp.* плоских аккумулятивных равнин; 4 – сообщество двустворчатых моллюсков *E. tenuis* и *M. calcarea* плоских аккумулятивных равнин; 5 – сообщество двустворчатых моллюсков рода *Nuculana* и офиур *O. sarsi* плоских аккумулятивных равнин; 6 – сообщество двустворчатых моллюсков рода *Nuculana* и многощетинковых червей *M. sarsi* илистых равнин дниц замкнутых впадин; 7 – сообщество грунтоедов с доминированием червей *Golfingia sp.*, *Echiurus sp.*, *Maldanidae var.* и морских звезд *C. crispatus* абразионно-аккумулятивных и аккумулятивных склонов; 8 – геоморфологические ловушки; 9 – граница государственного природного заповедника «Остров Врангеля»; течения 10 – 11: 10 – теплое течение, 11 – холодное течение.

### Выводы

Эколого-геохимическая обстановка Чукотского моря может быть охарактеризована как благоприятная, что согласуется с данными предыдущих исследований [4].

Положение Чукотского моря между Беринговым морем и Северным Ледовитым океаном определяет смешанный характер его фауны. Современное экологическое состояние биоты Чукотского моря можно считать близким к среднепогодной норме.

По анализу распределения химических элементов в донных отложениях, геоморфологическим и литогеохимическим характеристикам, расчёту суммарного индекса загрязнения донных осадков, оценкам вероятности образования устойчивых концентраций загрязняющих веществ и состоянию бентоса, а также по результатам сопоставления с итогами предыдущих исследований и с данными по другим арктическим морям Чукотское море может быть отнесено к устойчивым к химическому загрязнению. Однако, так как в восточной части моря и вдоль побережья Чукотского п-ва наблюдаются относительно благоприятные условия аккумуляции загрязняющих веществ — устойчивость биоценозов определяется как относительно уязвимая. В ряду устойчивости Арктических морей к химическому загрязнению Чукотское море занимает первое место.

Можно выделить ряд факторов, которые могут серьезно повлиять на состояние донной экосистемы Чукотского моря в будущем:

- разработка шельфа и портостроительство в Чукотском море может привести к увеличению числа геоморфологических ловушек, которые являются местом, где аккумулируются загрязняющие вещества;
- увеличение концентрации подвижных форм тяжелых металлов в донных осадках в результате как изменений климата, так и антропогенных воздействий приведет к их активной миграции в пищевые цепи;
- повышение придонной температуры в результате климатических изменений может привести к перераспределению выделенных бентосных сообществ;
- превышение современного уровня концентрации тяжелых металлов, например в результате возобновления судоходства по Северному морскому пути, создания военных баз, разработки шельфа и др. может стать толчком к деградации изученных донных сообществ.

### Литература

1. Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии)/ Гл. ред.: Грамберг И.С., Лаверов Н.П.; Отв. ред. Додин Д.А. — СПб.: Наука, 2000. — 247 с.
2. Арктические моря // Геология и полезные ископаемые России. Т.5. Арктические и Дальневосточные моря. Кн. 1. / Ред. Грамберг И.С., Иванов В.Л., Погребинский Ю.Е. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. — 468 с.
3. Геохимия окружающей среды / Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. — М.: Недра, 1990. — 335 с.
4. Исследование экосистем Берингова и Чукотского морей / Под ред. Ю.А. Израэля, А.В. Цыбань. — СПб.: 1992. — 357 с.
5. Макаров В.В. Материалы по количественному учету донной фауны северной части Берингова моря и Чукотского моря // Исслед. дальневост. морей СССР, вып. 25, 1937, с. 260-291.
6. Опекунов А.Ю., Холмянский М.А., Куриленко В.В. Введение в экогеологию шельфа. — СПб., 2000. — 176 с.
7. Петелин В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков. — М.: Наука, 1967. — 128 с.



8. *Погребов В.Б., Шилин М.Б.* Экологический мониторинг прибрежной зоны Арктических морей. – СПб., 2001. – 94 с.
9. *Сиренко Б.И., Гагаев С.Ю.* Изучение бентосной фауны в Чукотском море – история и новые результаты экспедиций по программе «Русалка» в 2004 и 2005 годах [Электронный ресурс] / Russian-American Long-term Census of the Arctic (RUSALCA) 2004-2005 Expedition. – Электрон. дан. – NOAA, 2010. – Режим доступа: [http://www.arctic.noaa.gov/aro/russian-american/2004\\_2005/](http://www.arctic.noaa.gov/aro/russian-american/2004_2005/), свободный. – Загл. с экрана. – Яз., англ.
10. *Gromet, L.P.* The «North American shale composite»: Its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dymek, L.A. Haskin, R.L. Korotev // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1986. – Vol. 48. – P. 2469-2482.
11. *Long E.R.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments / E.R. Long, D.D. Macdonald, L. Sherri, F.D. Smith // *Environmental Management.* – 1995. – Vol. 19. – P. 81-97.
12. Northern Sea Route Dynamic Environmental Atlas./ Editors: O.W. Brude, K.A. Moe, V. Bakken, R. Hansson, L.H. Larsen, S. M. Løvås, J. Thomassen, Ø. Wiig. – Norsk Polarinstitutt Meddelelse – Nr. 147. – 1998. – 58 p.

Авторы признательны Е.А. Гусеву, Е.А. Зыкову, В.Н. Чуруну и А.Г. Зинченко за помощь в проведении исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Германии (грант № OSL-12-13).